



刘小川,工学博士,研究员,国家级青年人才,航空工业集团特级技术专家。现任中国飞机强度研究所副所长,结构冲击动力学航空科技重点实验室副主任,陕西省飞行器振动、冲击与噪声重点实验室副主任,陕西省振动工程学会副理事长,航空学会结构强度分会委员。《航空工程进展》《航空科学技术》《应用力学学报》青年编委。

主要从事航空强度技术研究工作,先后主持国家自然科学基金、国防基础科研等各类科研项目 20 余项,发表学术论文 60 余篇,出版专著 2 部,授权发明专利 20 余件,获得国防技术发明一等奖等各类科技成果 10 余项。

航空结构动力学研究的进展与展望

刘小川[1,2,4],马君峰[3,4],白春玉[2,4],李凯翔[3,4],邹学锋[3,4],
王彬文[1,2,4],张永杰[5]

(1. 中国飞机强度研究所,710065 西安;2. 结构冲击动力学航空科技重点实验室,710065 西安;
3. 航空噪声与振动航空科技重点实验室,710065 西安;4. 陕西省飞行器振动冲击与噪声重点实验室,710065 西安;
5. 西北工业大学民航学院,710072 西安)

摘　要:飞机服役过程中,会经历地面滑行、空中机动等复杂的动态过程,飞机结构与系统在这些动态过程中将经受各类动态载荷的单独或联合作用,由此产生的结构动力学问题与飞机的服役安全和乘员的乘坐品质等直接相关,是航空工程中的关键技术难题。本研究梳理了军用飞机结构完整性大纲和结构强度规范,以及运输类飞机适航规章中的结构动力学相关要求,给出了结构动力学在航空装备研制流程中的相互关系,并从载荷、结构、响应和控制的角度,对航空结构动力学研究的主要问题进行了分类。从振动疲劳寿命预计与舒适性评估、振动主被动控制、复杂与极端环境结构动力学等几个重点方面,对航空结构动力学研究现状进行了综述,并结合未来航空装备研制的需求和振动新兴前沿技术的发展方向,对航空结构动力学的未来发展方向进行了展望。

关键词:飞机结构;结构动力学;动载荷;振动疲劳;振动控制;极端环境

中图分类号:TU473　　**文献标志码:**A

收稿日期:2022-04-15　　**修回日期:**2022-05-14

基金项目:国家级科研项目;航空科学基金资助项目(No. 2018ZA23002)

通信作者:王彬文,研究员。E-mail:jfma623@126.com

引用格式:刘小川,马君峰,白春玉,等. 航空结构动力学研究的进展与展望[J]. 应用力学学报,2022,39(3):409-436.
LIU Xiaochuan, MA Junfeng, BAI Chunyu, et al. Progress and prospect of aviation structural dynamics research[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2022, 39(3):409-436.

Progress and prospect of aviation structural dynamics research

LIU Xiaochuan[1,2,4], MA Junfeng[3,4], BAI Chunyu[2,4], LI Kaixiang[3,4], ZOU Xuefeng[3,4], WANG Binwen[1,2,4], ZHANG Yongjie[5]

(1. Aircraft Strength Research Institute of China, 710065 Xi'an, China;
2. Aviation Technology Key Laboratory of Structure Impact Dynamics, 710065 Xi'an, China;
3. Aviation Technology Key Laboratory of Aeronautic Acustics and Vibration, 710065 Xi'an, China;
4. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Aircraft Vibration, Impact and Noise, 710065 Xi'an, China;
5. Collague of Civil Aviation, Northwestern polytechnical University, 710072 Xi'an, China)

Abstract: In the process of aircraft service, it will experience complex dynamic processes such as ground taxiing and maneuver etc. The aircraft structure and airborne equipment will bear the individual or joint effect of various dynamic loads during these processes. The induced structural dynamic problems are directly related to the aircraft service safety and passengers' ride comfort. This paper sorts out the requirements of structural dynamics in the military airplane structural integrity program and strength specification, as well as the airworthiness regulation of civil aircraft. The relationship between the structural dynamics and R&D of aviation equipment is presented. The main issues of aircraft structural dynamics are classified from the aspects of loads, structure, response and control. At last, the prospect of aircraft structural dynamics is briefly concluded considering the needs in aircraft equipment research and the newly developed vibration techniques.

Key words: aircraft structure; structural dynamics; dynamic load; vibration fatigue; vibration control; extreme environment

飞机在运营和服役过程中,会经历复杂的动态过程,如地面滑行、武器发射、突风、抖振、离散源撞击等,将产生各类振动、冲击与噪声等动态载荷,所产生的动力学响应不仅与飞机的运动状态有关,也与飞机结构和系统本身的动力学特性密切相关,同时也与动态载荷自身的幅频、相频特性直接相关。当动态响应超出阈值,将会对飞机的飞行品质、结构安全、系统可靠性以及人机功效性等造成影响,严重时可能导致结构损伤甚至破坏、机载设备性能降级或功能失效、恶化乘员乘坐舒适性或影响飞行机组的操作等[1-3]。国内外多个型号飞机都有因振动产生的结构疲劳破坏(图 1),如某型飞机后机身边条结构因振动出现裂纹故障[4],以及某型歼击机机身副油箱尾锥因振动产生结构裂纹,瞬间撕裂尾锥、吹掉安定板[5]等。管路泄漏是飞机液压系统最普遍的故障,占系统故障的 70% 以上[6],严重威胁飞行安全,而振动是其主要诱因。例如某型教练飞机在试飞中,由于液压操纵系统三向接头因振动导致裂纹,液压油全部泄漏,某型歼击机在试飞中,由于发动机的转子振动发生突变,使油管断裂[7]等。

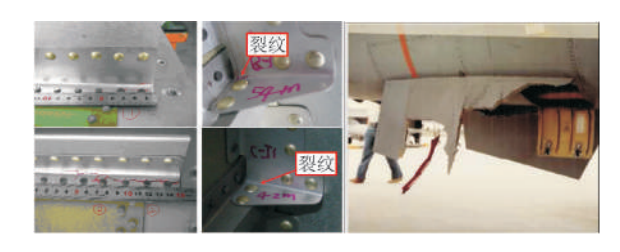


图 1　振动导致的飞机局部结构破坏

Fig. 1　Structure failure caused by vibration

机载设备因振动导致的故障是飞机故障的重要来源。如某型飞机光电探测设备因振动导致红外大视场图像抖动[8],某型飞机机载设备因振动导致设备安装平台螺栓、设备自身盖板螺钉脱落及振松等[9]。

在实际飞行中,空勤人员感受的振动强度、频率、方向以及持续时间往往会影响其舒适度、工作效率、健康和安全[10]。空勤人员位置处振动水平的高低直接影响空勤人员的工效性。工效性降低的后果可能是[11]:人的视觉模糊,视分辨率降低,判读仪表发生困难;武器瞄准困难,命中率降低;注意力分散,容易疲劳;使操纵不准确,甚至失误。此外,民用飞机乘客的乘坐舒适性也受座椅处振动水平的影响。

振动过大会导致乘客出现手脚发麻等不舒适的感觉,严重影响乘客的乘坐体验[12]。

按照研究的要素划分,航空结构动力学研究的体系包括动载荷(输入)、结构(对象)和响应(输出),如图 2 所示。已知动载荷和结构动特性,求解结构的动响应,称为响应分析,如结构的振动疲劳分析、振动舒适性分析、振动稳定性分析等;已知动载荷和结构动响应,确定结构动特性,则称为结构的动态参数识别,如振动参数识别、振动载荷传递路径识别等;已知结构动特性和结构动响应,求解作用于结构的动载荷,称为动载荷预计,如振动载荷与环境的预计、振动载荷的编谱等。通常称第一个问题为结构动力学的正问题,后两个问题为结构动力学反问题。另外,降低结构动响应称为振动控制,包括降低动载荷(载荷减缓)、改变结构动特性(结构优化)和抑制结构响应(结构的主被动控制)。

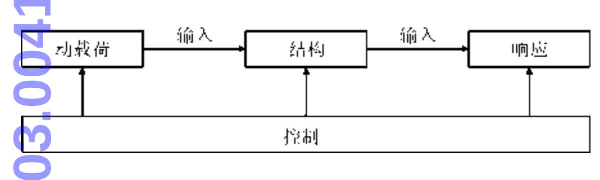


图 2　结构动力学要素

Fig. 2　Key points of structural dynamics

从动态载荷的作用方式,飞机结构动力学问题可分为动强度和动力环境两类,一般把动态载荷直接作用产生的结构动响应、损伤与破坏称之为动强度问题,把以基础运动的形式使得结构、机载设备和人员产生动响应的问题称为振动环境问题[2]。动强度问题主要有强迫响应和动稳定性等,强迫响应由周期或随机振动(如突风、地面滑跑等)或瞬态冲击(鸟撞、着陆撞击等)引发。动稳定性问题是结构/系统与外部激励的耦合作用,如颤振是结构弹性力、惯性力与气动力的耦合,起落架摆振则是起落架刚度、轮胎刚度与外部激励间的复杂作用过程[2-3]。

随着航空装备性能要求的持续提升和服役环境的复杂化,动强度问题和动力学环境问题越来越突出,国内外因动强度问题和动力环境问题引发的航空事故层出不穷。据统计,由环境应力引起的航空事故中,振动所引起的问题约占 30%[3],振动疲劳导致的叶片破裂约占航空发动机总故障的 20%[13](图 3),已成为制约装备战斗力生成、出勤效率提升等的关键问题。首先是多种载荷的联合作用或耦合作用越来越明显,如内埋弹仓的声振耦合问题、高性能战斗机尾翼抖振疲劳问题等,以及随着液压系统使用压力的增大也将使得管路振动问题更加棘手。其次动态载荷与使用环境之间的耦合关系越来越复杂,如热-振、热-噪声等多物理场问题,是高超声速飞行器研制中的重大技术难题[14]。同时振动噪声环境下的乘员舒适性越来越受关注,是影响民机产品市场接受度的重要因素,从客舱声学品质、噪声排放等角度提出了更高的指标要求,向着多指标综合、主观客观结合的方向发展[15]。正因为结构动力学问题的多发性和复杂性,军用飞机结构完整性大纲与强度刚度规范、民机适航规章等都对飞机的结构动力学问题作了专门的要求。

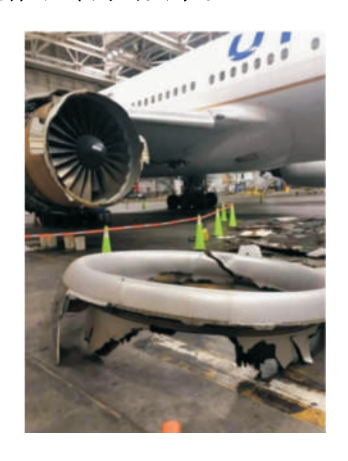


图 3　发动机叶片破坏[13]

Fig. 3　Failure of engine blade[13]

航空结构动力学具有能量跨度大、速度和频带范围宽、影响因素多等突出特点,按照载荷的特点可以分为振动、冲击与噪声 3 大领域,本研究重点关注振动环境下的结构动力学研究进展。航空结构冲击动力学的研究进展可以参考文献[16-19],航空噪声相关研究进展可以参考文献[20-23],气动弹性相关研究进展可以参考文献[24-26]。同时,直升机的动力学问题与固定翼飞机也有极大差异,本研究以固定翼飞机的振动问题为主。

本研究梳理了军用飞机结构完整性大纲和结构强度规范以及运输类飞机适航规章中的结构动力学相关要求,给出了结构动力学在航空装备研制流程中的结合关系,并从载荷、结构、响应和控制的脉络,对航空结构动力学研究的主要问题进行了分类。总结了结构振动疲劳寿命预计与舒适性评估、结构振动主被动控制、复杂与极端环境结构动力学等几个重点方面的研究现状,并结合未来航空装备研制的需求和振动新兴前沿技术的发展方向,对航空结构动力学的未来发展方向进行了展望。

1 军机强度规范与民机适航规章的相关要求

强度规范是对飞机产品设计、制造、试验和使用过程中所获得经验和教训的总结与提炼,是新型航空装备研制和现有型号改型改进必须遵循的总体要求和关键依据[27-29]。我国的军机顶层规范主要包括GJB 775A-2012《军用飞机结构完整性大纲》[30]和GJB 67A-2008《军用飞机结构强度规范》[31]。结构完整性是关系到飞机安全使用、成本费用和功能的机体结构强度、刚度、损伤容限及耐久性等所要求的结构特性总称。军用飞机结构完整性大纲明确提出了结构动力学设计、分析与验证要求。如表1所示,其贯穿于任务Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ和Ⅴ中,涵盖了飞机结构动强度设计准则、动载荷及振动环境识别、结构的振动响应及耐久性分析、多层级的结构动力学试验,以及服役保障阶段的动强度问题排查与动载荷/环境测量等。

表1 军用飞机结构完整性大纲要求[30]

Tab. 1 Requirements in aircraft structural integrity program (ASIP)[30]

任务Ⅰ	任务Ⅱ	任务Ⅲ	任务Ⅳ	任务Ⅴ
设计资料	设计分析与研制试验	全尺寸试验	部队管理资料	部队管理
飞机结构完整性大纲总计划;	材料和结构设计许用值;	静强度试验;	最终分析	载荷/环境谱测量;
结构设计准则;	载荷分析;	耐久性试验;	强度概述	单机跟踪数据;
损伤容限和耐久性控制计划;	设计使用载荷谱;	损伤容限试验;	部队结构维修计划;	单机维修时间;
材料、工艺和连接方法的选择;	设计化学/热/气候环境谱;	飞行和地面操作试验;	载荷/环境谱测量;	结构维修记录
设计使用寿命和设计使用用途	损伤容限分析;	声耐久性试验;	单机跟踪大纲	
	耐久性分析;	飞行振动试验;		
	声耐久性分析;	气弹试验;		
	振动分析;	试验结果的解释和评估		
	气动弹性分析;			
	核武器效应分析;			
	非核武器效应分析			

军用飞机结构强度规范给出了结构动力学的具体要求,以及验证这些要求应进行的分析与试验,主要包括动载荷和环境、振动分析与试验、气动弹性分析与试验、声耐久性分析与试验等。以GJB 67.7A和GJB 67.8A为例,对气动弹性和振动问题做了较为全面的规定(见表2)。

表2 军用飞机结构强度规范动力学相关要求[31]

Tab. 2 Requirements of airplane strength specifications[31]

分部	条款要求	动力学分析内容
67.7A 气动弹性	3.1 一般要求	颤振分析
	3.2 详细要求	发散分析
	3.2.1 气动弹性稳定性	气动伺服弹性稳定性分析
	3.2.2 破损安全稳定性准则	壁板颤振分析
	3.2.3 环境对气动弹性的影响	旋转颤振分析
		破损安全气动弹性稳定性分析
67.8A 振动和航空声耐久性	3.1 一般要求	结构动力学分析
	3.1.1 材料、设计和构造	声和振动载荷分析
	3.1.2 声和振动载荷及耐久性	动响应分析
	3.1.3 振动预计	声和振动疲劳寿命分析
	3.1.4 局部振动	乘员舒适性分析
	3.2 详细要求	
	3.2.1 声和振动载荷源	
	3.2.2 环境控制	
	3.2.3 结构振动	
	3.2.4 设备振动	
	3.2.5 发动机减振安装系统	
	3.2.6 空勤人员工效性和乘员舒适性	
	3.2.7 外来物撞击损伤	

为了支撑相关试验的开展,还制定系列的振动环境试验要求与试验方法标准,如我国的 GJB 150A《军用装备实验室环境试验方法》[32] 就规定了军用飞机服役过程的结构动强度试验方法。

民用飞机的使用条件和要求与军机有很大不同,对安全性有着更加苛刻的要求。适航规章是民机研制与运营安全必须依照执行的纲领性文件,国内外均颁布了系列民机适航规章、专用条件和咨询通告等,以贯彻民机研制的适航理念。在中国民航运输类飞机适航规章[33](CCAR 25 部)的 B(飞行)、C(结构)、D(设计与构造)和 E(动力装置)等分部中,均涉及了结构动力学的相关要求,包括振动和抖振、飞机结构声疲劳、气动弹性稳定性、飞机滑跑稳定性等,表 3 给出了其中的部分内容。

表 3 CCAR-25 动强度相关条款和简要说明[33]

Tab. 3 Requirements in CCAR-25[33]

条款分类	相关条款编号	条款要求说明
振动和抖振	§25.251 振动和抖振 §25.253 高速特性 §25.305 强度和变形 §25.341 阵风和紊流载荷 §25.371 陀螺载荷 §25.875 螺旋桨附近区域的加强 §25.907 螺旋桨振动 §25.1461 含高能转子的设备 §25.771 驾驶舱 §25.963 燃油箱 §25.965 燃油箱试验 §25.1015 滑油箱试验	a)飞机(含部件)不会发生任何过度振动和抖振(失速警告抖振是允许的);飞机能够承受在可能运行条件下发生的任何振动和抖振。 b)动力装置支承结构载荷必须计及陀螺效应;发动机和短舱整流罩、螺旋桨振动桨叶和高能转子必须能够承受可能遇到的任何振动。 c)驾驶舱设备的振动和噪声不得影响飞机的安全运行。 d)燃油箱/滑油箱能承受运行中可能的振动、惯性、液体及结构的载荷而不损坏。
气弹稳定性	§25.629 气动弹性稳定性要求	必须通过分析与试验表明飞机的气动弹性稳定性;气动弹性稳定性评定包括颤振、发散、操纵反效以及任何因结构变形引起的稳定性、操纵性的过度丧失;飞行情况包括正常情况和飞机带有失效、故障或不利条件的非正常情况。
飞机滑跑稳定性	§25.233 航向稳定性和操纵性	飞机在滑行时必须有足够的航向操纵性,这可在结合其他试验一起进行的起飞前滑行的过程中予以表明。

2 航空结构动力学研究的技术体系

航空装备研制是复杂的系统工程[34],大致可以分为概念设计、初步设计、详细设计、工程试制、试验验证等阶段,是型号研制总体需求的确认、分解、实现与验证的过程。航空结构动力学设计、评估与验证相关工作贯穿了装备研制和服役使用的全过程,同样遵从系统工程思想,由需求的逐级分解到设计要求的逐级验证, 如图 4 所示。根据逐级分解的动力学需求进行结构设计的过程, 称作动力学设计, 动力学建模、数值分析与试验试飞是基本的研究手段。

将动力学研究的基本要素与航空装备研制流程、航空装备结构特点(材料多样、薄壁结构、组合结构等)、航空结构与系统研制要求(轻质长寿命、高可靠性、高安全性等)、航空结构动载荷特征(振源多、频带宽、边界复杂、载荷复杂)、军机结构完整性与强度刚度规范、民机适航规章等要求相结合,构建起覆盖材料-部件-整机(包含乘员)的多层级全要素航空结构动力学研究体系,以支撑先进航空装备的研制和安全使用,如图 5 所示。

飞机结构是由框(肋)、桁条和蒙皮组成的薄壁结构,重量轻、柔度相对较大,相比通用机械结构,更易发生总体或局部的自激或受迫振动问题,一些关键系统结构如液压燃油管路等,也易于出现流固耦合诱发的振动故障。动力学设计是解决这些振动问题的有效手段,由于振动问题除了与载荷有关,还与结构本身的动力学特性(刚度、惯性、阻尼等)以及飞机系统布置等相关,使得动力学设计一直是航空工程中的难点。一般而言,飞机结构动力学设计的基本要求包括:①避免有害的共振,如航炮支持结构的固有频率应避开发射频率及其倍频;②避免过度的振动,如把重要设备安装位置处的振幅控制在一定量值之下;③满足稳定性要求,如颤振与起落架摆振等,要求有一定的稳定性裕度。

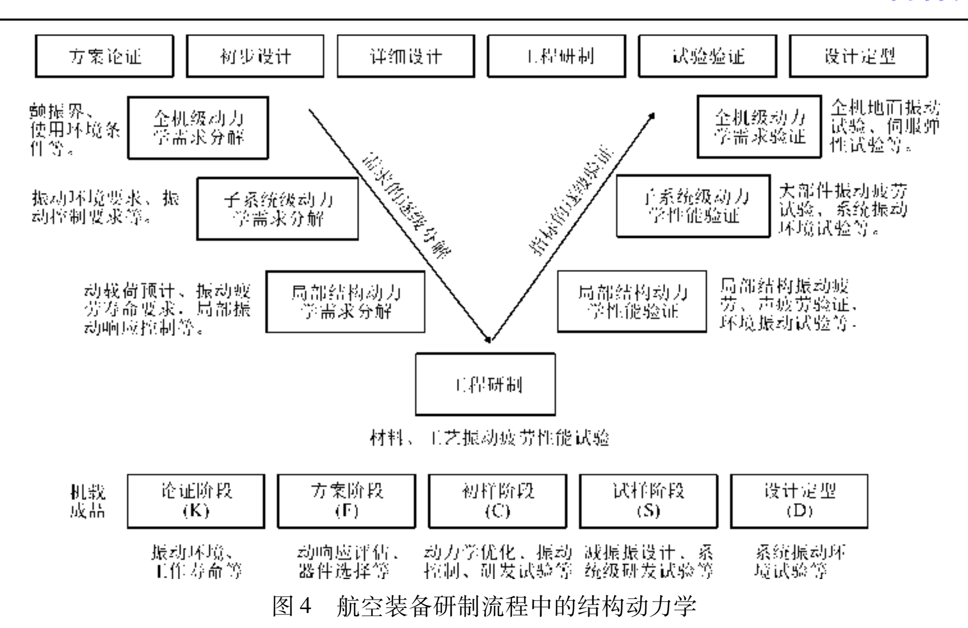


图 4　航空装备研制流程中的结构动力学

Fig. 4　Structural dynamics in R&D process of aviation equipment

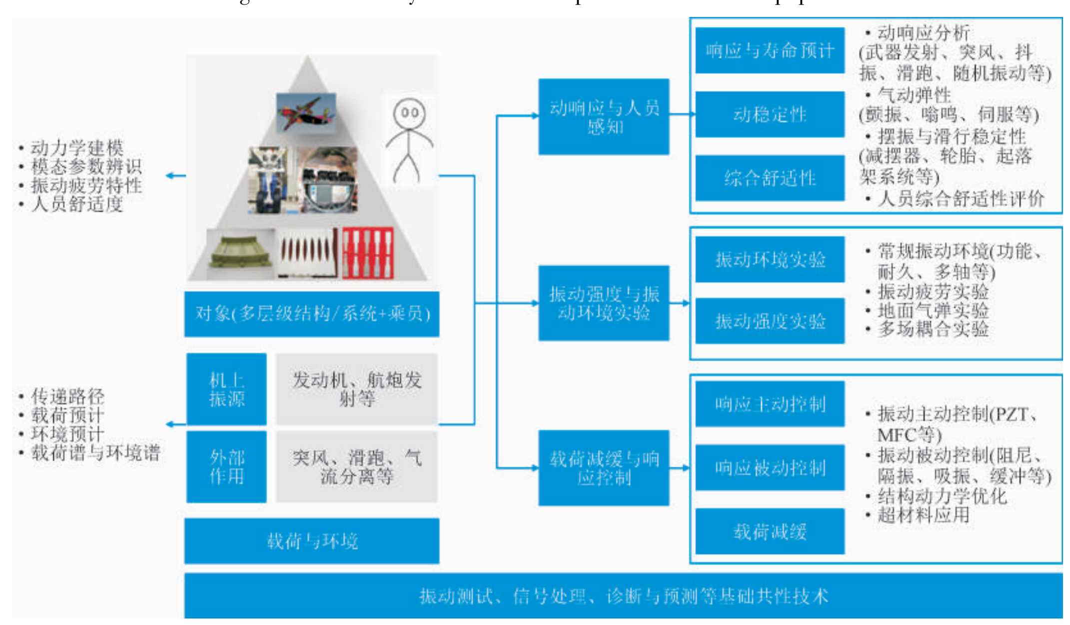


图 5　航空结构动力学研究体系

Fig. 5　System of aviation structural dynamics

3　振动环境下结构寿命预计与舒适性评估

3.1　动载荷与振动环境

准确获得飞机结构的动载荷和振动环境是开展结构动力学研究的基础。动载荷和振动环境一般通过飞行测试和分析预计得到，并以功率谱密度函数的形式给出[3,13]。

通过结构响应和结构特性估算作用于结构的动载荷称作动载荷识别，主要有直接法、正则化方法、概率统计法等[35]。Thompson 和 Thite 等[36-37]研究了频域识别方法的病态性问题，并对比了多种正则化方法对改善载荷识别精度和稳定性的效果。Liu 等[38]综合考虑了测量响应和频响函数中的噪声影响，提出了一种基于整体截断误差最小的识别方法(TTLS)。Rezayat 等[39]在载荷作用位置未知的情况下，基于应变响应构建了一种新的载荷识别方法。张方等[40]详细介绍了离散系统的单点和多点动载荷的识别、连续梁结构的点载荷识别以及一维分布动载荷的识别问题，说明了工程结构动载荷识别的方法和识别过程，并建立了时域和频域识别模型。许锋等[41]针对动态载荷所具有的短时、非平稳性等

特点，指出可以利用模态滤波器、小波分析和分形过程分析等当前信号分析与处理前沿理论所具备的各自优点，构造高精度动态载荷识别模型。林家浩和智浩等[42-43]通过逆虚拟激励法实现了通过测量响应的自谱和互谱得到了载荷的自谱和互谱。毛玉明等[44]将结构的输入载荷表示成一系列的参数形式，利用灵敏度迭代法确定出相应的载荷参数，随之识别出动载荷。

国外在振动环境测试与编谱方面已形成了系统的测试方法，建立了数据库，为型号研制、振动环境预计与验证提供了支撑[45-47]。国内也进行了一系列飞机结构振动环境预计、测试及数据归纳、编谱的工作[48-50]。张书名等[48]开展了系列飞机机载设备环境的飞行实测工作，为进一步编制飞机机载设备综合环境应力试验剖面提供了真实有效的振动实测数据依据。韩连平等[49]测试了某型军机导弹发射装置的振动情况，为提高导弹发射装置发控盒和其他电子设备的可靠性提供了设计依据。朱攀等[50]设计了一套包括测试系统搭建、试验状态确定及试飞数据处理的测试方法，并应用于 ARJ21-700 飞机的振动环境测试中。钟德均等[51]结合我国军机的使用实际，对 MIL-STD-810F 中振动环境预计方法进行了验证，并提出了修正公式。王光芦等[52]基于 BP 神经网络的方法准确地预计出了对应飞行状态参数下的飞机飞行振动，如图 6 和图 7 所示。刘昭等[53]也采用类似的方法进行了机载外挂的振动环境预计，得到高精度预计结果。田永卫等[54]以某型飞机实测数据为基础，基于现有国军标和相关标准，提出了分区域、多状态条件下的振动规范谱编制归纳方法，编制了该实测飞机的振动环境谱，见图 8。霍文辉等[55]通过开展飞机振动环境谱的飞行实测，给出了典型任务剖面的功率谱密度处理结果，为飞机耐久性/损伤容限优化设计提供了依据。

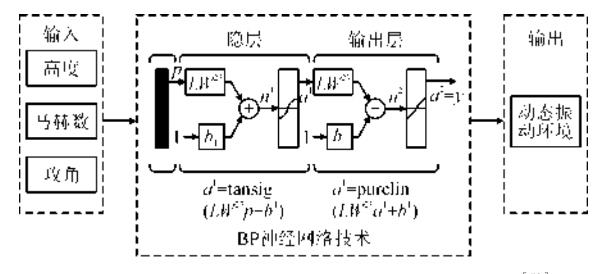


图 6　基于 BP 神经网络的飞行振动预计模型[52]

Fig. 6　Prediction model of flight vibration based on BP neural network[52]

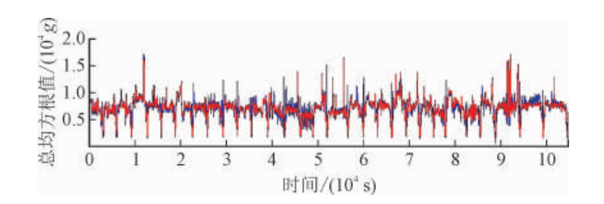


图 7　飞机实测振动与神经网络预计结果比较[52]

Fig. 7　Comparation of the results predicted by neural network and by flight test[52]

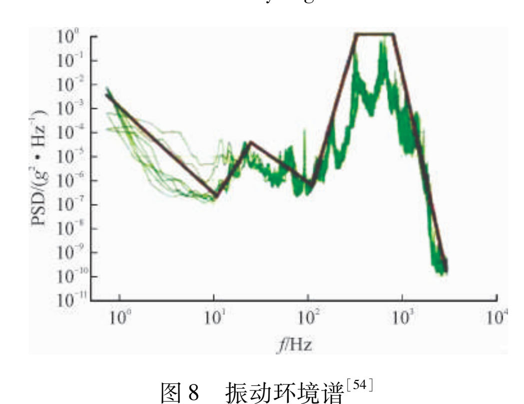


图 8　振动环境谱[54]

Fig. 8　Spectrum of vibration environment[54]

3.2　振动疲劳寿命预计

飞机结构在单一的动态载荷作用或与其他载荷的耦合作用下可能产生严重的振动疲劳问题，从而导致结构失效，如飞机的进气道壁板、燃油管路、航炮支架等都是易发生振动疲劳失效的部位。振动疲劳寿命预计是结构服役定寿、结构安全性设计及评定的关键。

振动疲劳寿命预计包括时域方法和频域方法，两类方法都是在获得结构危险部位振动响应的基础上，基于损伤累积模型和材料的振动应力-疲劳寿命（S-N）曲线参数，分别在时域和频域范围内进行寿命分析。不同点在于时域方法一般通过雨流计数等方式对结构动态应力的时域响应进行峰谷值统计，获得结构的振动疲劳寿命[56-60]。而频域方法一般通过对结构动态应力的频域循环特性进行信息提取，获取应力频谱符合某种分布规律的概率密度函数，进而进行振动疲劳寿命预计，计算流程如图 9 所示。

在结构设计阶段，结构危险部位的应力时间历程是很难得到的，另外，由于在实际工作载荷作用下构件的动态响应往往非常复杂，时域数据量巨大，因此，频域方法更为普遍地应用于工程结构的振动疲劳寿命预计。此方法的关键是如何由响应（包括窄带和宽带）的功率谱密度函数计算疲劳损伤。对于窄带响应过程，比较经典的是 Bendat 提出的方

法[61]。该方法认为一个窄带过程的幅值和范围的概率分布均为一个 Rayleigh 分布。对宽带响应过程,Wirsching,Tunna,Hancock、Chaudhury-Dover 等分别提出了基于窄带假设的修正因子法[62],这种方法不考虑潜在的应力循环次数的分布问题,而是通过修正窄带过程下的损伤得到宽带过程的损伤。Zhao,Dirlik 和 Fu 等分别提出了概率密度函数拟合法[62]。这种方法忽略高频小波均值的影响,只估计循环幅值的边缘概率密度函数(或范围的概率密度函数)。Benasciutti 等[63]给出了幅值均值的联合概率分布,适用对均值敏感的构件或材料,或者响应为非高斯随机过程的问题。

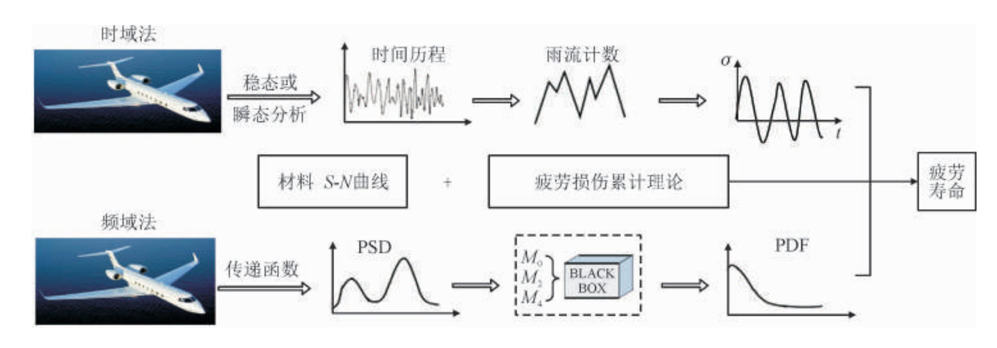


图 9 振动疲劳寿命预计的时域方法和频域方法

Fig. 9 Vibration fatigue life prediction methods in time domain and frequency domain

在航空结构振动疲劳寿命预计方面,隋立军[64]针对某型飞机进气道经常出现的蒙皮裂纹、铆钉断裂等现象,通过采用有限元法分析了进气道结构的应力和振动疲劳寿命。陈群志等[65]针对某型飞机机翼前缘襟翼单面连接结构紧固件松动、脱落的故障问题,采用拉-拉疲劳试验与振动疲劳试验,研究了振动疲劳载荷与传统疲劳载荷作用下飞机结构紧固件的失效模式及寿命分布规律的差异。曹明红等[66]专门设计若干组具有明显双模态响应的悬臂梁随机振动疲劳试验,验证了各种频域估算方法的适用性和寿命估算精度。

在振动疲劳损伤演化规律与累积模型构建方面,李鹏等[67]从宏观和微观两个维度,揭示了典型金属材料的振动疲劳破坏机理研究,提高了振动疲劳寿命估算方法的预计精度。王虎等[68]给出了一种基于非线性累积损伤的随机振动疲劳寿命分析方法,该方法将频域疲劳寿命的预估结果平分为若干段,考虑顺序效应对每一段结果进行修正并叠加,得到修正的振动疲劳寿命结果。

在多轴加载或复杂应力状态下的结构振动疲劳寿命预计方面,白春玉等[69-70]研究了多轴振动环境下等效 Von Mises 应力的修正方法,在时域与频域内等效 Von Mises 应力的时域历程与功率谱密度(PSD)的获取方法,以及基于应力不变量的多轴振动疲劳寿命估算方法等。周航博[71]对基于临界面上 3 种应力准则的多轴频域法作出了系统分析,发现在宽带激励下,基于临界面上最大正应力和剪应力准则的多轴频域法预测结构寿命更加准确,同时多轴频域法相比多轴时域法可以更快更有效地预测结构的疲劳寿命。金南等[72]提出了一种利用方向余弦确定危险平面,基于临界平面法的频域分析方法,该方法基于结构危险点的应力功率谱密度矩阵,将经过危险点且剪应力方差最大的平面作为结构的临界平面,然后将该平面上的正应力与剪应力进行线性组合得到等效应力功率谱密度函数,最后结合线性疲劳损伤累积理论与 Tovo-Benasciutti 法确定结构的寿命。

3.3 振动环境试验技术

振动环境试验是考核、评定飞机结构及系统在动载荷环境下适应性的一种重要研究手段,一般在实验室内通过激励模拟装置进行振动环境下的考核,用来检验结构在实际使用过程中能否满足要求,同时暴露结构的设计缺陷,为优化设计提供试验数据支持。振动台就是常用的振动环境试验加载设施。按照振动类型分类,分为正弦振动、随机振动及混合型振动等[73];按照试验考核具体目的又分为振动功能试验及振动耐久试验。振动功能试验可考核受试对象的功能和性能在振动载荷作用下是否满足规定要求,该试验进行过程中受试对象处于工作状态,以检验其功能和性能,验证是否满足规定的要求。振动耐久试验可考核受试对象在振动载荷作用下和作用后是否仍保持完整而不被破坏,该试验进行过程中受试对象不处于工作状态,在试验结束后

检测其是否满足规定的要求。军用装备实验室环境试验方法第16部分:振动试验(GJB 150.16A)[32]中规定了军机装机的主要机载设备,如军用螺旋桨式飞机机载设备、军用直升机机载设备及发动机吊舱内设备等,需根据标准规定的振动谱、振动量值和持续时间进行振动功能试验及振动耐久试验。

近年来,振动环境试验朝着受试件尺寸更大、试验边界条件更真实、试验环境更复杂的趋势发展,越来越多的全尺寸大部件产品急需振动环境试验进行试验考核。相应的,其要求边界条件更接近真实工作条件,试验环境也不仅仅局限于振动环境,而是包括振动、静力、热、噪声等多场耦合环境。

在单轴振动环境试验方面,魏英魁等[74]研究总结了大尺寸结构振动试验系统现状与振动试验方法,对国内外针对大尺寸振动试验采取的方法和技术进行了总结,并对未来大尺寸结构产品振动试验系统的发展进行了展望,认为大推力振动台和多台单轴并激系统是未来大尺寸振动试验系统的发展方向;范真等[75]总结了国内外振动环境试验设备及技术的现状,给出了振动环境试验设备及技术发展方向。蒋瑜等[76]提出一种用于评估随机振动环境下工程结构长期耐久性和疲劳可靠性的加速试验技术,认为对于高斯过程,影响结构振动疲劳寿命最大的因素是激励的功率谱密度在其一阶固有频率处的量值。张治君等[77]研究了一种基于激光测量的非接触式热振联合环境试验技术,并基于该技术搭建了一套热振联合环境试验系统对某试验件进行试验。

在多轴振动环境试验方面,常规的振动环境试验多基于线性叠加原理,单轴向分别开展试验[78-80],忽略了多轴向的叠加关系,试验振动工况和真实振动工况的差异一般通过增加试验时间或增大试验量级的方式进行补偿[81-82]。但真实的产品或结构总是在复杂的载荷场或振动环境下工作,多轴向振动试验可以更真实地模拟产品寿命期经历的振动环境。典型的三轴振动试验系统如图10所示。

陈家焱等[83]阐述了多点激励振动试验系统基本控制原理,并对时域波形复现的关键技术迭代算法和驱动信号重叠连接,以及频谱再现的关键技术反馈修正算法和时域随机化技术进行了介绍。王伟[84]对三轴向振动试验系统的解耦补偿进行了研究,搭建三轴向振动试验系统与实时控制系统,验证了三轴向振动试验系统进行机械解耦与控制解耦的必要性。孙建勇等[85]对多轴向振动试验实施技术进行了探讨,提出了试验实施时需考虑的主要事项。邱汉平等[86]介绍了多轴随机振动试验控制的基本理论,并应用该理论研发了一套多轴随机振动试验控制系统。魏巍[87]则讨论了冗余多轴振动台耦合特性及控制策略。



图10 典型的三轴振动试验系统[84]

Fig. 10 Typical tri-axial vibration test system[84]

3.4 振动舒适性评价

运输类飞机舱内舒适性涵盖范畴较大,包括客舱振动环境、噪声环境、气压与气压脉动、湿度、空气品质、活动空间、座椅舒适度、舱室照明、色彩等,振动舒适性是舒适性设计的重要方面。

Griffin 等[88-91]通过大量的人体振动舒适性试验研究,提出"综合振动总值",其主导编写的 BS6841-1987 作为后续 ISO 2631 的基础。随着振动舒适性研究的深入,相关的国际标准也经历了不断地修订,国际标准组织 ISO 颁布了 ISO 2631-1:1997[92],该标准全面阐述了在不同人体中心坐标系(坐姿、立姿、卧姿)下人体受全身振动的评价方法。将计权加速度后的综合振动总值作为评价指标,给出较为合理的舒适性评价结果,我国参照此标准制定了 GB/T 13441.1-2007[93]。

国外对振动舒适性研究较早,Ciloglu 等[94]针对飞机客舱区域乘客全身振动及座椅舒适性,采用六轴振动台模拟起飞、着陆、和巡航的振动水平,并分别采用平均加权振动、振动剂量值和传递性数据计算座椅有效传递值,对飞机座椅整体振动和动态座椅舒适性进行了研究,还讨论了乘客重量与垫层材料对振动传递性的影响。Demić 等[95]通过座椅到头部的传输函数(STHT)研究了宽带随机振动对人体的影响,认为在双向随机振动下的人体行为不能用单向随机振动的叠加来近似。Nishiyama 等[96]研究

了由人体、座椅、方向盘和踏板组成的汽车子系统的振动特性，表明人的姿态对舒适性存在影响。Mohajer等[97]采用人体生物力学模型(HBM)对人体全身振动(WBV)进行了分析，得到了人体质量、道路等级和车速对人体分段不同方向振动的影响。Mellert 等[98]采用模拟器和真实长途飞行的调查数据研究了噪音和振动对机组(包括乘务员和飞行员)的影响，获得了相关参数对人的影响程度。

国内对人体振动舒适性研究大多为基础理论研究，早期的研究领域主要集中在汽车和高铁上[99-103]。李晓玲等[103]针对动态驾驶环境所导致人体肌肉疲劳开展了相关实验研究，通过振动台模拟人体所处振动环境，采用表面肌电测试系统对肱二头肌、股二头肌及竖脊肌人体部位进行测量，同时采用20 名受试人员进行主观评价。评价结果与测试数据对比分析说明振动环境直接影响人体骨骼肌的肌氧含量、人体舒适性及疲劳度。支开印等[104]开展了装载机座椅振动舒适度分析与评价方法研究，对比分析了座椅的舒适性指标、传递率特性等特征参数，总结得到了该类座椅的舒适性分析和评价方法，并运用得到的舒适性评估方法对水平方向的座椅振动测试数据进行了振动舒适性评价。彭波[105]针对铁道客车振动舒适性开展了虚拟试验研究，通过构建虚拟试验系统模拟客车振动舒适性应用场景，直观地展现列车运行全过程的数值模拟，虚拟试验过程中构建数值参数同应用场景参数相关联。

近年来，对航空飞行器舱室的振动舒适性研究也逐渐得到学者关注。周福强等[15]针对某型轰炸机座椅开展振动舒适性优化，建立了飞机-座椅-人体振动舒适度模型，分析了空中飞行阶段低频振动来源，通过改进伞包刚度和阻尼系数，大幅减少了传递给人体的高频振动和相应低频振动能量。李凯翔等[106]针对飞机舱内局部区域振动对乘坐舒适性影响的研究，设计基于飞行实测谱的人体振动舒适性主观评价试验(图 11)，得到减振设计目标频带，进而设计减振装置。张飞等[107]建立人体振动舒适性试验平台，以飞机客舱座椅实测振动数据为基础，研究频率、振幅等参数对人体振动舒适性影响。代承霖等[108]基于某型客机飞行测试数据，分别采用 ISO 2631 和 GJB 67.8A 的人体振动舒适性评价方法，对该客机进行振动舒适性评价，评价结果表明，ISO 2631-1:1997 相比 GJB 67.8A-2008 对舒适性的要求更加严苛。

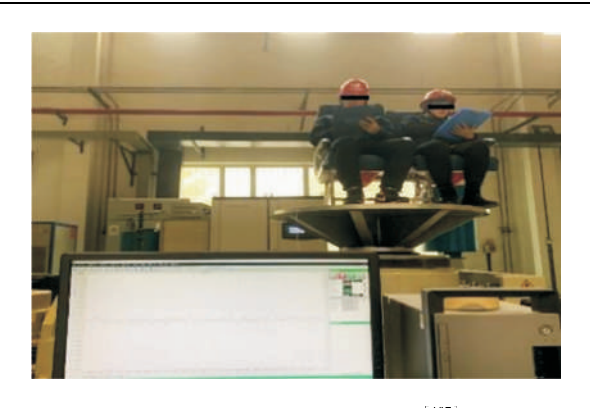


图 11　人体振动舒适性试验[107]

Fig. 11　Test of ridding comfort[107]

4　结构振动主被动控制

4.1　振动被动控制技术

航空结构振动被动控制方法是目前主要的振动响应抑制方法，包括采用阻尼、隔振器和动力吸振器等方式进行。

通过粘贴阻尼材料的方式实现对振动的抑制，是振动被动控制的重要途径。魏宇宏等[109]针对某型飞机短舱尾罩振动裂纹问题，采用 FZ-2 航空用阻尼材料开展抑振研究(图 12)。贺红林等[110]对敷设自由阻尼层和约束阻尼层悬臂板进行减振特性分析，研究不同阻尼处理形式对模态阻尼比和振动响应的影响。孙亚飞等[111]利用黏弹性沥青阻尼材料粘贴于飞机座舱模型尾部结构上，从而实现飞机座舱模型尾部结构的振动抑制。

王明旭等[112]基于变密度拓扑优化方法，对约束阻尼板阻尼结构开展了优化布局研究。张彩霞等[113]针对薄壁结构约束阻尼减振问题，采用耦合有限元和间接边界元的方法对约束阻尼层的厚度进行了优化设计研究，明确了约束阻尼层结构的厚度对结构减振效果的影响。尹绪超等[114]采用阻尼层对加强筋板架结构开展了约束阻尼层在不同敷设面积(四角敷设、中心敷设以及全敷设)以及不同激励位置点下的减振试验，结果表明在给定激励位置和频率下局部敷设也能达到全敷设下的减振效果，说明通过合理调整约束阻尼的敷设位置能够实现结构的减振优化设计。

隔振器是连接设备和基础结构之间的弹性单元，可以减少和消除基础结构传递到设备的振动，包括金属橡胶隔振器、钢弹簧隔振器以及活塞液压式

隔振器等。史文欣等[115]航空光电吊舱的振动问题，采用一种航空用的金属隔振器对不同跨距下的减振效果进行了试验验证，结果表明隔振器采用大跨距的布局方式相比小跨距转动的振动量级减少了 37.9% 。季凡渝等[116]通过将刚性杆改为滑动铰支，设计新型多向安装隔振器，并在某型歼击机电子设备隔振安装中进行了应用。王进强等[117]采用形状记忆合金作为驱动器，设计了具有两种状态的可变频隔振器。余慕春等[118]基于剪切增稠液体设计一种活塞液压式隔振器，建立隔振器模型，对隔振器的影响因素以及减振效果进行了研究，结果表明采用剪切增稠液体隔振器能够有效抑制共振峰且不会对高频的隔振性能产生不利影响。

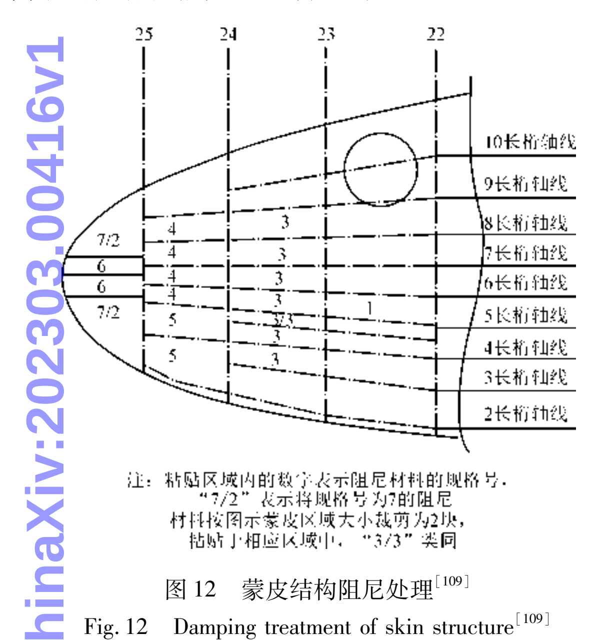


图 12　蒙皮结构阻尼处理[109]

Fig. 12　Damping treatment of skin structure[109]

苏渤等[119]以直升机仪表板为例，设计了一套隔振系统，有效降低了仪表板部位的振动。李鹏等[120]设计金属橡胶隔振器，如图 13 所示，并对隔振器和结构优化设计两种方法对客舱地板结构振动进行了仿真验证，结果表明：隔振方案的减振效果更明显，而且付出的重量代价较小。

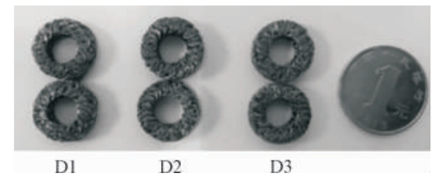


图 13　金属橡胶隔振器[120]

Fig. 13　Metal rubber isolator[120]

对于激振力为较低频率的单频或离散频率激励，动力吸振器相比隔振器更有优势。付涛[121]针对复合夹层板结构开展了基于动力吸振器的振动抑制研究，并设计了一种梁式动力吸振器，通过实验验证所建模型的有效性。郑文[122]利用简单胞映射算法求解了起落架和悬架系统用动力吸振器参数的多目标优化问题，实现了对飞机起落架系统的保护作用。韩锋[123]以某舱体结构在一定频率范围内的最大位移为优化目标，比较了优化前后吸振器的减振效率，最后，设计出动力吸振器的试验件，对动力吸振器的吸振效果进行验证。魏荣祥等[124]针对某型飞机飞行过程中平尾振动较大问题，开展动力吸振器吸振器的参数选型与设计研究，飞机测试结果表明，在期望频率处的振动幅值降低了 50% 。Kassem 和 Zhou 等[125-127]提出了一类非线性动力吸振器，并应用于壁板结构颤振抑制问题，取得了良好效果。

近年来，基于声学超材料的结构减振技术得到了非常多的关注。声学超材料是指具有负动态等效质量密度和负动态等效模量的人工亚波长结构，可在低频下形成带隙（图 14），对低频振动噪声控制具有深远意义[128-129]。

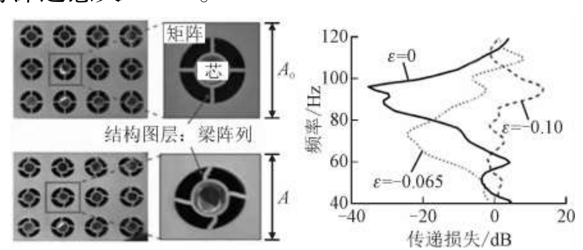


图 14　声学超材料及其带隙特性[128]

Fig. 14　Acoustic metamaterial and its band gap feature[128]

此外，声学黑洞也是一种新颖的减振结构，其利用薄壁结构几何参数或者材料特性参数的梯度变化，使波在结构中的传播速度逐渐减小而不发生反射的现象（图 15），在薄壁结构的减振降噪中具有应用潜力[130]。

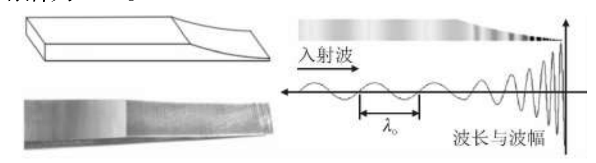


图 15　声学黑洞结构及原理[130]

Fig. 15　Structure and its principle of acoustic blackhole[130]

4.2　振动主动控制技术

主动控制技术针对低频控制效果好，克服了被动控制低频段效果不佳的缺点，近年来也在航空结构振动控制中得到了关注。

翟太珍[131]以陶瓷压电材料为作动器，采用神经网络对控制系统进行多通道建模，针对飞机典型加

筋壁板结构开展了单模态和多模态的振动主动控制研究。刘健[132]基于惯性作动器结合 PID 控制器实现了结构振动的主动控制(图 16)。陆洋等[133]采用电磁共振式作动器对某轻型直升机驾驶位座椅进行振动主动控制试验,对飞行各速度状态下的驾驶员座椅处的垂向减振效果进行了评估,结果表明减振效率在 30% ~66% 之间,如图 17 所示。王晓宇等[134]采用半主动控制方法研究了空间柔性天线臂的振动控制问题,取得了良好的控制效果。季宏丽等[135-137]研究了采用同步开关压电作动器的振动半主动控制问题,提出了一种利用自适应滤波及同步开关阻尼技术的超低频振动半主动控制器,以及具有负电容的非对称分流电路,用于增强振动抑制效果。高乐[138]采用压电纤维复合材料(MFC)对飞机垂直尾翼结构模型进行了正弦激励下的主动控制研究,振幅降低 45% 以上。廉晶晶[139]则研究了基于光致伸缩驱动器的梁结构振动主动控制问题。

图 16 惯性作动器测试实验[132]

Fig. 16 Test of inertia actuator[132]

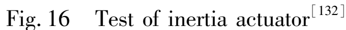





图 17 电磁作动器安装位置和 ACSR 控制系统硬件安装[133]

Fig. 17 Installation of electro-magneto actuators and ACSR control system[133]

Chen 等[140]以 F/A-18 垂直尾翼为研究对象,开展了基于多层压电作动器的垂尾抖振控制方法研究,并在全尺寸结构上进行了验证。图 18 所示为 F/A-18 垂直尾翼上作动器的分布情况。Paradies 等[141]将 MFC(压电纤维材料)布置到无人机的机翼上,如图 19 所示,通过驱动 MFC 实现飞机中机翼的主动控制。波音公司和 NASA 对布置压电陶瓷片的智能旋翼进行了实验研究[142],结果表明了智能材料结构控制的有效性,图 20 为风洞环境下智能旋翼结构图。Tarazaga 等[143]进行了 MFC 智能材料的桁架结构振动控制的研究工作,其使用的“正位反馈”控制系统获得了较好的控制效果。Vignal 等[144]针对 EC225 型直升机采用了电磁惯性作动器分别布置在驾驶舱和客舱两侧方式进行了座椅振动主动控制,见图 21 所示,飞行测试结果表明振动水平始终小于 0.1g,取得了很好的控制效果。

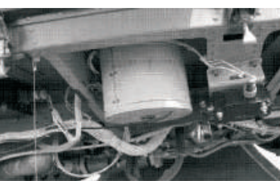
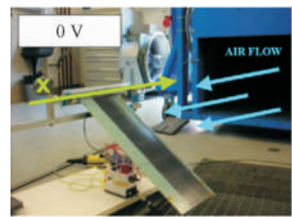



图 18 F/A-18 垂尾压电作动器分布图[140]

Fig. 18 Piezo actuators on vertical fin of F/A-18[140]



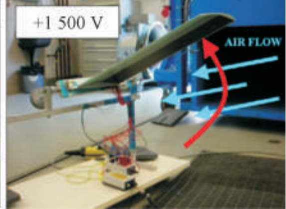
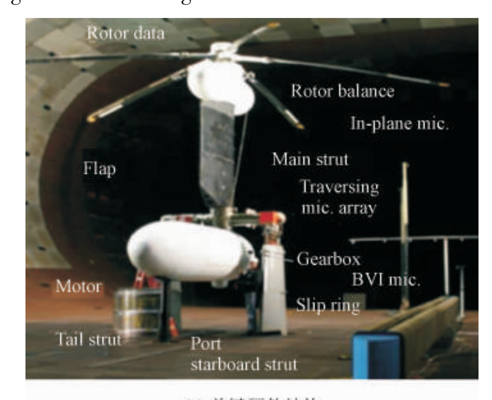


图 19 带有 MFC 主动机翼结构[141]

Fig. 19 Active wing structure with MFC actuators[141]



(a) 关键硬件结构



(b) 风洞中 SMART 转子、叶片和襟翼

图 20 40×80 英尺风洞环境下的智能旋翼结构[142]

Fig. 20 Smart blades in 40×80 sq. fts wind tunnel[142]

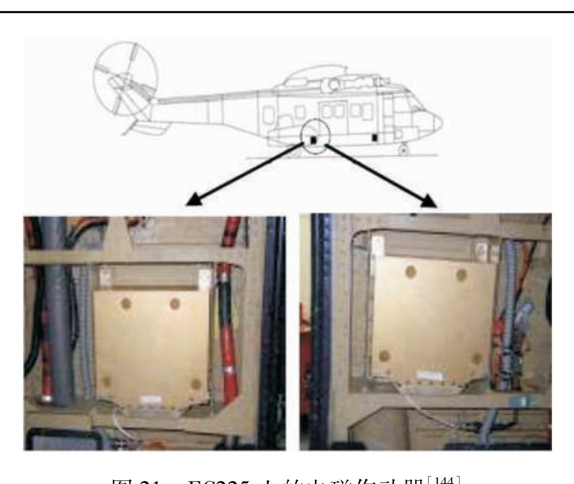


图 21　EC225 上的电磁作动器[144]

Fig. 21　Electro-magneto actuators in EC225[144]

4.3　气动弹性剪裁技术

随着当前复合材料在飞行器中的大量使用，气动弹性剪裁作为一种结构设计理念愈发受到科研人员重视。Shirk 等[145]将气动弹性剪裁定义为通过在结构设计中引入方向性刚度控制其气动弹性变形，进而改善结构的气动性能与结构动力学性能。

气动弹性剪裁设计，本质上是一种多参数结构优化问题，因此如何构建工程适用的优化模型是气动弹性剪裁设计的关键[146]。Werter 等[147]构建了一种具有普适性的机翼优化模型，模型被沿展向分为多个具有独立厚度与刚度的区域，优化结果证明对于非大柔性机翼本模型均能取得良好优化效果。Leon 等[148]采用序列线性规划（SLP）算法求解最优方案，在求解时除了常规的颤振速度敏度之外，还采用了颤振主要参与模态的特征根作为优化目标，优化结果均良好。Georgiou 等[149]在优化时采用了细菌觅食算法（BFO）并论证与遗传算法相比该方法具有明显优势。近年来随着国内计算技术的发展，一些国产软件也被应用于处理此类优化问题。段世慧等[150]采用国产优化软件 COMPASS（composite structural analysis and synthesis system）构建了气动弹性剪裁优化模型，其中设计参数除了常规的铺层厚度还包括铺层主方向，优化效果良好。

通过优化模型获得的仅是理论设计方案，如何将理论结果转化为工程实际结构设计方案也是气动弹性剪裁设计中重要的一环。刘湘宁等[151]研究了铺层角度与铺设构型对大展弦比机翼结构刚度以及颤振临界速度的影响，Christine 等[152]发现为翼肋与梁引入曲率，可以弥补结构因蒙皮设计造成的刚度损失，从而增加蒙皮的可设计范围。由于复合材料加工技术的发展，丝束牵引复合材料（tow-steered composites）[153]被愈发广泛地应用于气动弹性剪裁设计领域。Stodieck 等[154]研究了二维平面内不同铺层方式对气动弹性性能的影响，结果表明与直纤维复合材料板相比，丝束牵引复合材料板在同样的气动弹性性能下重量明显减轻。Bret 等[155]对比了曲线加强肋与丝束牵引复合材料对结构刚度与颤振特性的影响，证明丝束牵引复合材料对结构性能提升更明显。

5　复杂与极端环境结构动力学

5.1　力热声振多场耦合实验与响应预计

飞行器特定部位在飞行过程中，弹性结构会与周围流体发生很强的相互作用，产生诸如结构振动、非定常气动力、气动热以及噪声等多场耦合载荷环境，这些载荷之间相互关联与耦合。结构在这种耦合载荷环境下的响应水平较高，并且表现出强烈的非线性特征，更容易发生破坏，尤其航空航天薄壁结构。如高超音速飞行器蒙皮、热防护系统、超音速飞机进气道、大推力航空发动机燃烧室火焰筒、隔热防振屏、旋转部件和尾喷管等，在工作时承受机械力、气动力、热载荷和高强声载荷，在这些复杂载荷作用下薄壁结构可能发生热屈曲失稳，产生大挠度非线性响应，诱发结构疲劳损伤失效，严重影响结构使用安全性和可靠性。力热声振多场耦合分析与实验技术能够更好地模拟结构服役环境，从而真实地反映出结构在复杂载荷环境下的响应及疲劳寿命特性。该技术主要分为多场载荷预示、试验方法与平台研制、复杂环境参数测量、多场耦合仿真分析等几个方面。

在多场严酷载荷预示研究方面，国外早期基于型号需求开展了大量研究工作，Douglas 等[156]采用 Kriging 等 5 种统计建模方法对 NASA 可重复利用发射器 RLV 进行了快速气动热分析。Blevins 等[157]则详细描述了高超声速飞行器的热-振动-噪声载荷特征；Tzong 等[158]在高超声速飞行器研究总结报告中系统梳理了某验证机各部位的热、动压、机械力等载荷分布特征，并给出了适用于地面考核验证的载荷处理方法。20 世纪以来，国外在多场载荷环境预计方面均开展了更加深入的工作，洛克希德-马丁航空公司的相关科研人员针对高超声速巡航飞行器，开

展了较为详细的载荷环境预计以及多场耦合响应分析工作。近年来,国内借助 CSD、CFD 等手段的气动热、气动力、噪声等载荷预示方法也得到了快速发展。邹元杰等[159]阐述了航天器全频域动力学环境特点,并且介绍了基于有限元/边界元和统计能量的全频振动噪声环境预计方法。杨彦广等[160]分别从数值模拟、风洞试验两个方面描述了近年来临近空间高超声速飞行器跨流域气动热/力预示方法。陈坚强等[161]综述了国内外高超声速飞行器气动力数据天地换算技术相关的基本进展。张子健等[162]采用理论和数值两步渐进方法,给出了高温气体效应对高超声速飞行器的气动力/热特性产生的影响。

在多场耦合试验方法研究方面,国外很早就开始了先进飞行器结构多场耦合强度试验方面的研究工作,通过多载荷协调加载与综合控制技术实现了热、力、振、噪等载荷环境的模拟,形成了较为成熟的技术储备及研究成果,建立了实力雄厚的试验设施,为先进飞行器的研制及验证提供了有力的支撑。例如,美国 NASA 的戈达德(Goddard)空间飞行中心有可以实现气动热、振动、噪声、低氧环境的模拟平台;NASA 兰利研究中心、美国空军莱特实验室分别建有总声压级为 175 dB 的热/噪声耦合试验装置以及热/噪声/静力多场耦合试验设施[14]。近年来随着 MANTA、SR-72、X-37B 等高超声速飞机的研制,美国 Boeing、LM、AFRL、NASA 等机构纷纷开展了热、力、振动、噪声等多场耦合环境下的结构强度分析与验证能力建设,形成了热/力、热/噪声、热/力/噪声、热/噪声/振动等多场环境下的试验能力,满足了 Ma7 高超声速飞机全飞行包线下的结构强度设计与验证需求。NASA Dryden 研究中心的 Hudson 等[163]对 X-37 C/SiC 方向舵在低氧环境(氮气环境箱)中进行了热振动试验,试验温度为 482 ℃,此外,NASA 还开展了一系列的 X-33、X-37、X-43A 结构热试验、热噪声试验项目[164],如针对 X-33 壁板结构进行了总声压级为 158 dB,温度为 816 ℃的声疲劳测试,试验中通过表面安装的多个电阻式动态应变片获取动态数据,如图 22 所示。

国内近年来在型号需求推动下,相关实验能力也得到了快速发展。张治君等[77]基于石英灯辐射加热器与振动台建立了热振动环境,并对飞行器结构进行了加热温度不低于 600 ℃的热振动试验,在试验中使用了基于激光测振仪的非接触式振动控制。吴大方等[165]通过硅碳棒与振动台结合实现 1 500 ℃有氧热振动环境,为了解决振动过程中温度传感器脱落的问题,将试验件嵌入金属钨罩中,通过加热钨罩间接获取内部隔热材料试验件温度。吴振强等[166]为了研究高温复合材料壁板在严酷环境中的完整性与耐久性,基于行波管与石英灯辐射加热装置设计了热噪声试验平台,并对 C/SiC 壁板开展了 600 ℃/165 dB 的热噪声试验动态响应研究。王晓飞等[167]基于相同原理的实验平台完成了典型C/SiC 蒙皮骨架构型件的热噪声试验,实现了1 200 ℃/163 dB 的热噪声试验,实验结束后发现蒙皮出现裂纹。除传统的单场和两场试验外,当前三场、四场等多场试验仍处于探索阶段,邹学锋等[168]针对高超声速飞行器结构地面验证的迫切需求,设计了一套基于行波管的多场联合试验平台,实现了气动力、高温、噪声及机械振动等载荷的联合加载,并在多个型号中得到了应用,如图 23 所示。



图 22 方向舵子部件试验[164]

Fig. 22 Test of part of C/SiC rudder[164]

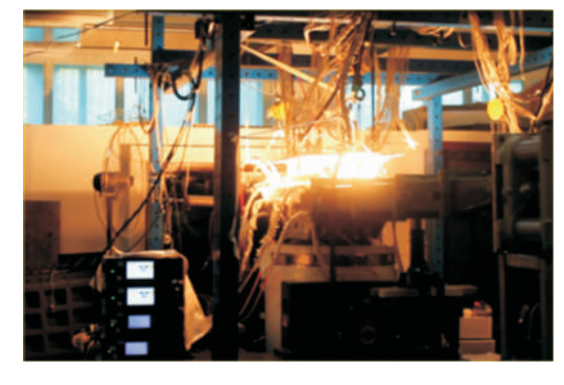


图 23 结构热/力/振动/噪声多场耦合试验[168]

Fig. 23 Structure test in multi-fields environment of force-vibration-acoustic[168]

在复杂环境多物理参数测量技术研究方面,多场耦合试验需要对实验过程中的温度、应变、加速度、声压级等进行测量,以获取试验件的动态响应特性,然而随着环境复杂性和严酷性加剧,多场试验面

临的参数测量挑战也越来越大。回顾历史,对噪声、温度等载荷参数以及应变、加速度等响应参数的测量大致经历了接触式点测量、非接触式点测量、非接触式场测量、多参数同步测量等阶段。当前,光纤、荧光、涂层等先进传感器/工艺、激光测振、数字图像相关变形测量(DIC)、多光谱辐射测温(IR)等已成为前沿热点。罗罗公司研制了采用 266 nm 高功率脉冲激光器测量涡轮叶片表面温度的荧光测温系统。此外,普惠公司、美国橡树岭国家实验室和洛斯阿拉莫斯国家实验室研制的基于光纤传输的荧光测温系统,实现了燃烧环境下 1 200 ℃ 静子叶片温度测量。

Girard 等[169]深入分析多光谱辐射测温理论并开展实践,将多光谱辐射测温系统的探测范围扩展到了紫外区域。Rahmatabadi[170]利用 DIC 方法对复合材料的力学性能进行了测试。目前,NASA、普惠公司、英国帝国理工大学在 DIC、IR 等测试技术方面实力雄厚,形成了成熟的货架产品[171]。国内近年来在非接触式测量技术研究方面发展迅速,王楠楠等[172]对几种蓝宝石光纤辐射测温技术的原理、现状、优缺点及发展趋势进行了深入总结,并进行了比较,为蓝宝石光纤温度测量应用奠定基础。宝剑光等[173]利用 DIC 方法对 1 200 ℃ 环境下的金属蜂窝板高温应变进行了测量。在近红外 CCD 测温技术研究方面,单色法、比色法和多谱段测温法都得了快速发展,符泰然等[174]将基于标定模式的双色测温拓展为基于非标定模式的三色比值辐射测温,给辐射测温方法与技术的改进与应用提供重要的指导。在高温环境下的非接触场变形测量方面,基于主动成像和有限带宽滤波的 DIC 方法也获得了应用(图 24),潘兵等[175]采用带通光学滤波主动成像系统,有效阻挡高温辐射中长波强的辐射对成像的干扰,获得了 1 200 ℃ 环境下的高质量图像。

在多物理场耦合响应仿真计算研究方面,国外近年来借助成熟的仿真手段开展了大量的两场甚至三场耦合仿真研究。Sucheendran 等[176]采用解析法对流场环境下进气道壁板的结构-声振耦合问题进行了研究。Malekzadeh 等[177]通过 Hamilton 原理导出了热环境下的运动方程,分析了功能梯度材料的温度变化、材料属性等参数对结构频率的影响。Liguore 等[178]利用 Patran/Nastran 与 Matlab 相结合,将 FEM/ROM 方法应用于极端热噪声载荷作用下的飞行器结构动响应计算。Przekop 等[179]研究了热声载荷下薄壁结构非线性振动响应,给出了屈曲跳变非线性行为对金属薄壁结构热声疲劳寿命的影响。Dechaumphai 等[180]采用流-热-固一体化有限元法,探究了高超声速飞行器前缘等载荷严重部位的气动热-结构相互作用。



图 24 基于主动成像的 DIC 方法在高温噪声试验中的应用[175]

Fig. 24 Application of DIC in high temperature and acoustic test[175]

Behnke 等[181]利用 Abaqus 计算了高超声速飞行器防热承载一体化结构(ITPS)在高温、气动和声载多场联合作用下的动态响应。Blades 等[182]开发了一套多物理场耦合分析工具,已应用于高超音速飞行器结构,给出了准静态耦合的空气热弹性板模拟结果。总的来看,国外在高效算法和高精度建模等方面具有显著优势,形成的专用工具已支撑了众多先进型号的研制。国内诸多学者在仿真分析方面也进行了积极探索。沙云东等[183]计算了多种热声载荷组合作用下薄壁结构大挠度非线性响应问题,总结了屈曲前/后结构特定区域拉应力和压应力的变化规律。贺尔铭等[184]研究了后屈曲时二维编织 C/SiC 复合材料板的热振动模态振型演化规律,分析了温度载荷对模态振型的影响规律。杨雄伟等[185]使用混合有限元-统计能量分析(FE-SEA)法对 X-43A 在高温环境、165 dB声压作用下的声振特性进行数值分析。沙云东等[186]还在非线性热声响应分析的基础上,采用雨流循环计数法,结合 Miner 线性损伤累积理论对疲劳寿命进行了估算。张正平[187]对飞行器薄壁结构在热噪声载荷环境中的动态响应分析,并对寿命预估等方面进行了科学总结,提出了未来的发展建议。周印佳等[188]采用分区求解及耦合界面数据传递的方法,实现了计算流体力学与热力全耦合有限元法的多耦合计算。

杨智春等[189]针对高超声速飞行器壁板在非定

常气动力、热载荷和噪声载荷共同作用下的稳定性问题开展了研究。桂业伟等[190]对高超声速飞行器流-热-固耦合问题的研究进展和分析策略进行了介绍,并详细阐述了自主研发的热环境/热响应耦合计算平台(FL-CAPTER)。邹学锋等[191]采用时域强耦合方法计算了声/热/静联合载荷下结构响应特性,捕捉了复杂载荷作用下结构的动力学响应变化特性以及临界失稳、屈曲跳变等现象。

5.2 热气弹分析与地面实验

高超声速飞行器由于其高机动性、大航程、毁伤能力出色等优势,是当前各国研究的热点[192]。此类飞行器飞行马赫数高,飞行环境复杂,在飞行过程中承受着严酷的气动载荷与气动热载荷,其结构的惯性力、弹性力及承受的非定常气动力、热效应四者之间相互耦合作用[193-194],从而引发热气动弹性问题。这种耦合效应会显著降低飞行器的飞行性能[194-195],甚至可能导致结构破坏,因此热气动弹性问题必须在高超声速飞行器设计研发的全周期内受到重视[196],从而确保飞行器的飞行品质。

热气动弹性问题是一个涉及结构、气动、热的多物理场耦合问题,难以建立统一方程一次性求解,因此目前研究通常采用多求解器分区计算-边界耦合的求解方法。针对真实结构进行分析时计算流体力学(CFD)、计算结构动力学(CSD)与计算传热学(CTD)求解器耦合计算量庞大。为了提高计算效率,使多场耦合问题分析在工程研制中能够实现,基于合理假设对多场耦合模型开展简化工作就成为了热气动弹性分析中较为重要的一步,如图 25 所示。Mcnamara 等[197]针对耦合模型简化工作做出假设,忽略了结构弹性变形与气动弹性响应对气动热效应的影响,提出了单向热耦合分析策略。虽然经过一定简化,但该方法已经能满足部分工程研制工作的需要。如 Tran 等[198]采用单向热耦合策略构建求解器,分析了 F-16 的热气动弹性稳定性并取得了良好效果。基于单向热耦合策略,吴志刚等[199]提出了热气动弹性的分层求解方法,即依次计算研究对象的温度分布、受温度场影响的结构刚度分布以及该刚度分布下的气动弹性响应,此时热气动弹性问题实际上被分为相互独立的气动热问题与气动弹性问题两部分。

虽然单向热耦合分析策略在计算效率方面具有较大优势,但在超音速流中结构弹性变形可能改变激波或膨胀波的出现位置,进而改变研究对象的温度场[200-207]。为进一步提升计算精度则必须采用考虑结构变形与气动热效应相互影响的双向耦合分析策略。Adam 等[208]建立了冯卡门薄板的双向耦合气动热弹性模型,研究结果表明,在气动加热计算中引入弹性变形会使热流发生非均匀变化,进而影响结构颤振特性。Culler 等[201]以简支平板为研究对象,对比了单向耦合与双向耦合的精度差异,结果表明当结构所受约束力较大时,由于应变较大的影响,双向耦合算法精度明显高于单向耦合,而当约束力较小时二者计算结果的差异不大。Yang 等[202]建立了壁板颤振的单向耦合与双向耦合模型,计算结果显示,由于双向耦合方法求得的结构温度梯度更明显,因此该方法求得的颤振动压边界更低,谢丹等[209]也针对 X-34A 进行了类似的研究。陈浩[203]将耦合策略进一步细化为非定常双向耦合、非定常单向耦合、准定常双向耦合和准定常单向耦合 4 种,并对每一种策略的求解过程与适用范围进行了详细叙述。

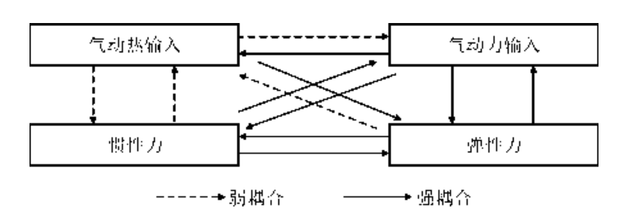


图 25 热气动弹性耦合关系

Fig. 25 Couple of thermal aeroelastic

除了多物理场耦合方法,非定常气动力求解方法也是热气动弹性问题分析的关键环节。在早期研究中由于计算能力限制,工程研制中通常采用频域计算方法,包括活塞理论[204-205]、牛顿冲击流理论[206-207]以及统一升力面理论[210]等。此类频域计算方法虽然对非线性流场的处理能力不足,但是凭借较高的计算效率以及相关研究对此类方法的不断优化[211],在目前的工程领域仍得到广泛应用。近年来随着计算流体力学技术的发展,时域非定常气动力计算方法也逐渐被应用于热气动弹性问题研究之中。Mcnamara 等[212]将不同的气动力计算方法进行了对比分析,发现采用 N-S 方程非定常气动力模型求解与频域方法求解的颤振边界相差达到了 12%。Lamorte 等[213]采用径向基函数构建 CFD/CSD 求解器,将湍流模型引入热气动弹性求解工作,结果显示湍流模型会在一定程度上增加颤振稳定性边界预测

的难度。为了提高计算效率,Crowel 等[214]研究了非定常气动力降阶模型,采用本征正交分解方法及代理模型,预测结构表面压强的变化,并以此修正定常降阶 CFD 模型,实现非定常气动力的计算。

杨超等[215]总结了高超声速飞行器的热气动弹性问题,指出飞行器结构的温度场与其飞行轨迹密切相关,在热气动弹性分析中考虑飞行轨迹的影响是十分必要的。Mcnamara 等[216]将温度定义为飞行轨迹的函数,分析了 FALCON 在特定轨迹下的热气动弹性性能。杨智春等[217]基于 Von Karman 大变形板理论,建立了热-声载荷和气动力共同作用下的壁板运动方程,分析了受热壁板的气动弹性问题。沈恩楠与郭同庆等[218-219]采用变刚度法计算了非巡航状态下全动舵面沿轨道运动过程中的热颤振特性。

近年来,随着吸气式高超声速飞行器的发展,热气动弹性与发动机推力耦合问题逐渐受到关注。杨超等[220]总结了吸气式高超声速飞行器的热气动弹性问题。叶正寅等[221]详细论述了围绕发动机相关的热气动弹性问题。Chavez 等[222]针对二维模型进行了气动弹性与推力耦合分析,验证了气动力与发动力推力的相互干扰,进而证明了推力对全机动特性均有显著影响。Klock 等[223]研究了吸气式高超声速飞行器热气动弹性仿真方法,建立了用于高超声速飞行器的分区多物理场仿真框架。

在热颤振试验技术方面,目前主要研究集中在高超声速风洞试验。苑凯华等[24]总结了目前热颤振风洞试验的两种技术路线,一种是采用模拟结构热刚度的模型进行常规风洞试验,另一种是采用标准模型进行高超声速高温风洞试验。由于技术难度较高,目前开展的高超声速热气动弹性研究较少,JI 等[224]设计了带有保护装置的颤振风洞试验台,采用加热气流对翼板进行了颤振试验,并测量了气动加热影响下翼板的温度分布。

地面颤振模拟试验具有成本低、安全性高、开放性强的优势,也有望成为一种有效的热气动弹性分析手段。潘树祥等[225]采用半物理仿真地面试验进行热气动弹性研究,试验采用多激振器激励真实结构模拟非定常气动力,但由于加载精度较低,试验结果存在一定误差。近年来,随着计算机性能及控制技术的发展,地面颤振模拟试验的相关技术难点接连获得突破[226-227],宋巧治等[228]研究了风洞试验模型的地面颤振模拟试验。李晓东等[229]开展了纯随机激励的热模态试验,如图 26 所示。陈浩宇等[230]则对地面热颤振模拟试验技术进行了总结,并指出了后续的发展方向。



图 26 热振联合试验[229]

Fig. 26 Thermal vibration test[229]

6 总结与展望

航空结构动力学问题与飞机的服役安全和乘员的乘坐品质等直接相关。军机结构完整性大纲与强度刚度规范、民机适航规章对结构动力学相关问题作了较为全面的要求,即飞机能够在给定的振动环境下安全可靠地工作、结构在振动载荷的循环作用下保持承载能力、机组可以在相应的功效性要求下正常执行任务。航空结构动力学是复杂的系统问题,载荷多源、结构多样、机理复杂,既有鲜明的工程特点,又蕴含着深刻的物理和力学规律。本研究从现代飞机研制的流程出发,介绍了航空结构动力学在航空装备研制流程各阶段的关注重点和任务,对航空结构动力学研究体系进行了梳理,总结了结构振动疲劳寿命预计与舒适性评估、结构振动主被动控制、复杂与极端环境结构动力学等重点方向近年来的研究现状。

从力学学科角度,诸如材料的振动疲劳损伤演化与累积物理机制、结构在复杂动态环境下的多尺度失效模式、动态载荷作用下的响应与寿命高精度预计方法、先进的振动载荷减缓与响应控制技术、复杂动力学过程的试验模拟技术等取得了长足的进展。

从航空工程角度,在振动环境预计与载荷谱编制、振动疲劳寿命预计、乘员振动舒适性评估、结构的主被动振动控制、极端环境下单一振动环境及多场耦合的地面试验方法、热气动弹性分析与试验方法等重点方面获得了技术突破。

新一代先进军用飞机将跨速域、跨空域使用,高速度、高机动、多功能等特点将带来愈加严酷和复杂的动力学环境,关键结构的振动疲劳、关键设备的振动环境、多物理场耦合等问题将更加凸显;而先进民机对安全性、舒适性、可靠性等同样提出了更高的要求,如何在轻量化、长寿命等约束下开展结构动力学设计也是重大挑战。航空结构动力学研究领域应对以下问题加大关注。

1)通过服役飞机振动环境的测试与统计处理,结合物理机制驱动的机器学习算法,发展面向复杂场景的高精度动载荷和振动环境预计方法,构建适应我国飞机设计和使用特点的动载荷与环境数据库,建立综合环境下的振动舒适度评价准则,支撑自主振动环境试验标准的更新和结构动力学设计。

2)结构在复杂应力状态和复杂载荷环境下的振动疲劳寿命高精度预计仍然面临巨大挑战,需要在多尺度损伤累积模型、多轴应力与多场载荷作用下的寿命预计方法等方面持续研究,并构建航空材料振动疲劳 *S-N* 曲线数据库,并关注复合材料混合连接结构及功能结构等的振动疲劳问题。

3)发展低动力学特性影响的结构动强度试验技术,建立空-地、部件-全机的动力学边界映射模型,提升多轴复杂载荷、极端环境和多场耦合环境下的动力学试验能力,构建完善面向高超声速飞行器的全尺寸乃至全机级热-振、地面热气弹等耦合试验能力。

4)促进智能结构的工程应用,降低系统复杂性和功耗,实现智能作动器/传感器的小型化/一体化,提高控制算法的鲁棒性和环境适应性;开发主被动一体的宽频段隔振器,推进声学/力学超材料、声学黑洞等前沿减振结构的工程化应用等。

5)面向载荷被动减缓和动响应控制需求,发展多约束多变量结构动力学优化设计方法,提高多场耦合仿真分析的效率与精度,并开发自主动力学仿真工具。

6)数字技术赋能振动工程,研究动力学数据驱动的数字孪生模型的建模标准与建模方法,探索数字孪生在航空结构动力学领域的应用,提升对结构健康状态的感知与预测能力。

致谢:感谢李益萱、曹明红、王纯、姜永平、代承霖、张飞、陈浩宇等在资料收集和文稿写作过程中提供的帮助。

参考文献

[1] HOWE D. 飞机载荷与结构布局[M]. 孙秦,韩忠华,钟小平,译. 北京:航空工业出版社,2014.

[2] 孙侠生. 民用飞机结构强度刚度设计与验证指南[M]. 北京:航空工业出版社,2012.

[3] 施荣明. 现代战斗机结构动强度设计技术指南[M]. 北京:航空工业出版社,2012.

[4] 李善勋,朱成香,马常亮,等. 某型飞机后机身边条结构故障分析[J]. 教练机,2015(3):21-25.
LI Shanxun, ZHU Chengxiang, MA Changliang, et al. Analysis of structure failure of aft fuselage strake[J]. Trainer,2015(3):21-25 (in Chinese).

[5] 朱广荣. 某型歼击机 XX 升机身副油箱尾锥振动故障分析研究[J]. 应用力学学报,2001,18(增刊1):20-23.
ZHU Guangrong. The structural vibration breakdown analysis research on the Fighter-XX centerline drop tank's tail cone[J]. Chinese journal of apllied mechanics,2001,18(S1):20-23(in Chinese).

[6] 刘强. 基于振动信号的液压管路裂纹故障研究[D]. 天津:中国民航大学,2020.

[7] 赵述元,陈钊,李国鸿,等. 新机试飞管路振动故障分析与排除[J]. 测控技术,2010,29(8):16-19.
ZHAO Shuyuan, CHEN Zhao, LI Guohong, et al. Analyzing and excluding vibration trouble in pipe in new aircraft flight test[J]. Measurement and control technolgy,2010,29(8):16-19(in Chinese).

[8] 魏诗朦,郭毓文. 某型飞机光电探测设备红外大视场图像抖动故障分析[J]. 航空维修与工程,2021(12):88-90.
WEI Shimeng, GUO Yuwen. Faultanalysis on image jitter of optic-electronic detecting equipment infrared large field view for a certain type of aircraft[J]. Aviation maintenance & engineering, 2021(12):88-90(in Chinese).

[9] 李家旭,张新平,谷迎松. 某机载设备安装平台的复合式隔振设计试验研究[J]. 机械科学与技术,2015,34(6):978-981.
LI Jiaxu, ZHANG Xinping, GU Yingsong. Experimental study of complex design for vibration isolation of certain airborne equipment installing platform[J]. Mechanical science and technology for aerospace engineering,2015,34(6):978-981(in Chinese).

[10] 周福强,张书明,闫楚良. 某型轰炸机座椅振动舒适性分析[J]. 振动、测试与诊断,2011,31(6):759-762.
ZHOU Fuqiang, ZHANG Shuming, YAN Chuliang. Analysis of vibration comfort of a bomber's seat[J]. Journal of vibration measurement & diagnosis,2011,31(6):759-762(in Chinese).

[11] 高文涛,张武林. 振动飞行试验数据归纳方法研究[J]. 现代机械,2020(3):54-57.
GAO Wentao, ZHANG Wulin. Study on the induction method of vibration flight test data[J]. Modern machinery,2020(3):54-57(in Chinese).

[12] 刘李娜,黄煜,龚楚楚,等. 噪声和振动等舒适度曲线的快速确定方法[J]. 噪声与振动控制,2021,41(2):77-82.
LIU Lina,HUANG Yu,GONG Chuchu,et al. Afast method of determining the equivalent comfort contours between noise and vibration[J]. Noise and vibration control,2021,41(2):77-82(in Chinese).

[13] 蒋祖国,田丁栓,周占廷. 飞机结构载荷/环境谱[M]. 北京:电子工业出版社,2012.

[14] 邹学锋,潘凯,燕群,等. 多场耦合环境下高超声速飞行器结构动强度问题综述[J]. 航空科学技术,2020,31(12):3-15.
ZOU Xuefeng,PAN Kai,YAN Qun,et al. Overview of dynamic strength of hypersonic vehicle structure in multi-field coupling environment[J]. Aeronautical science & technology,2020,31(12):3-15(in Chinese).

[15] 孔云志. 飞机驾驶舱舒适性评价方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2017.

[16] 刘小川,王彬文,白春玉,等. 航空结构冲击动力学技术的发展与展望[J]. 航空科学技术,2020,31(3):1-14.
LIU Xiaochuan,WANG Binwen,BAI Chunyu,et al. Progress and prospect of aviation structure impact dynamics[J]. Aeronatial science and technology,2020,31(3):1-14(in Chinese).

[17] 豆清波,刘小川,奚杨风光,等. 舰载机全机落震试验机翼升力模拟方法研究[J]. 振动与冲击,2018,37(2):51-56.
DOU Qingbo,LIU Xiaochuan,XIYANG Fengguang,et al. Wing lift simulation method during full scale carrier-based aircraft drop tests[J]. Journal of vibration and shock,2018,37(2):51-56(in Chinese).

[18] 刘小川,白春玉,惠旭龙,等. 民机机身结构耐撞性研究的进展与挑战[J]. 固体力学学报,2020,41(4):293-323.
LIU Xiaochuan,BAI Chunyu,XI Xulong,et al. Progress and challenge of research on crashworthiness of civil airplane fuselage structures[J]. Chinese journal of solid mechanics,2020,41(4):293-323(in Chinese).

[19] 刘小川,王计真,白春玉. 人工鸟研究进展及在飞机结构抗鸟撞中的应用[J]. 振动与冲击,2021,40(12):80-89.
LIU Xiaochuan,WANG Jizhen,BAI Chunyu. Overview on artificial bird and application on the structural bird-strike[J]. Journal of vibration and shock,2021,40(12):80-89(in Chinese).

[20] 刘沛清,李玲. 大型飞机增升装置气动噪声研究进展[J]. 民用飞机设计与研究,2019(1):1-10.
LIU Peiqing,LI Ling. Development ofinvestigation on high-lift device noise for large aircrafts[J]. Civil aircraft design and research,2019(1):1-10(in Chinese).

[21] 左孔成,陈鹏,王政,等. 飞机舱内噪声的研究现状[J]. 航空学报,2016,37(8):2370-2384.
ZUO Kongcheng,CHEN Peng,WANG Zheng,et al. Research status of aircraft interior noise[J]. Acta aeronautica et astronautica Sinica,2016,37(8):2370-2384(in Chinese).

[22] 张浩驰,宋文萍. 飞机机体噪声降噪方法研究进展[J]. 噪声与振动控制,2008,28(2):69-72.
ZHANG Haochi,SONG Wenping. Research on airframe noise analysis and reduction methods[J]. Noise and vibration control,2008,28(2):69-72(in Chinese).

[23] 毛宏宇,杨平,何龙标,等. 国内外飞机噪声标准研究进展及对比分析[J]. 计量科学与技术,2022,66(1):9-13.
MAO Hongyu,YANG Ping,HE Longbiao,et al. Research progress and comparative analysis of domestic and abroad aircraft noise standards[J]. Metrology science and technology,2022,66(1):9-13(in Chinese).

[24] 苑凯华,田海涛,高速飞行器气动弹性问题研究进展[J]. 战术导弹技术,2020(3):1-7.
YUAN Kaihua,TIAN Haitao. Research progress on of high speed vehicles[J]. Tactical missile technology,2020(3):1-7(in Chinese).

[25] 杨国伟. 航空工程跨声速气动弹性研究进展[C]//中国力学学会学术大会 2005 论文摘要集(上). 北京:北京工业大学,2005:100.

[26] 肖艳平,黄波,王越. 机翼气动弹性的研究综述[J]. 科技创新导报,2020,17(20):11-15.
XIAO Yanping,HUANG Bo,WANG Yue. Summary of research on the aeroelasticity of wing[J]. Science and technology innovation herald,2020,17(20):11-15(in Chinese).

[27] 中国航空综合技术研究所. 航空标准化与通用技术[M]. 北京:航空工业出版社,2013.

[28] 蒋祖国,周占廷,舒成辉. 我国现有飞机强度规范的更新和发展[J]. 航空学报,2003,24(4):339-341.
JIANG Zuguo,ZHOU Zhanting,SHU Chenghui. Updating and developing of the current aircraft strength specification in China[J]. Acta aeronautica et astronautica Sinica,2003,24(4):339-341(in Chinese).

[29] 焦志强,舒成辉,屈见忠,等. GJB 67A-2008《军用飞机结构强度规范》简介[J]. 航空标准化与质量,2009(6):38-42.
JIAO Zhiqiang,SHU Chenghui,QU Jianzhong,et al. Brief introduction to GJB 67A-2008 “Military airplane structural strength specification”[J]. Aeronautic atandarization & quality,2009(6):38-42(in Chinese).

[30] 中国人民解放军总装备部. 军用飞机结构完整性大纲:GJB 775A-2012[S]. 北京:中国人民解放军总装备部,2012.

[31] 中国人民解放军总装备部. 军用飞机结构强度规范:GJB 67A-2008[S]. 北京:中国人民解放军总装备部,2012.

[32] 中国人民解放军总装备部. 军用装备实验室环境试验方法:第6部分 振动试验:GJB 150.16A-2009[S]. 北京:中国人民解放军总装备部,2009.

[33] 中国民用航空局. 中国民用航空规章第 25 部运输类飞机适航标准:CCAR-25-R4[S]. 北京:中国民用航空总局,2011.

[34] 中国航空工业集团公司. 军用航空装备研制生产与服务保障程序(试行):Q/AVIC DR 4-2021[S]. 北京:中国航空工业集团公司,2021.

[35] 李锟. 分布动态载荷识别的理论与方法研究[D]. 长沙:湖南大学,2018.
[36] THITE A N,THOMSON D J. The quantification of structure-borne transmission paths by inverse methods(part 1):Improved singular value rejection methods[J]. Journal of sound and vibration,2003,264:411-431.
[37] CHOI H G,THITE A N,THOMSON D J. Comparison of methods for parameter selection in Tikhonov regularization with application to inverse force determination[J]. Journal of sound and vibration,2007,304:894-917.
[38] LIU Y,JR W S S. Dynamic force identification based on enhanced least squares and total least-squares schemes in the frequency domain[J]. Journal of sound and vibration,2005,282(1/2):37-60.
[39] REZAYAT A,NASSIRI V,PAUW B D,et al. Identification of dynamic forces using group-sparsity in frequency domain[J]. Mechanical systems and signal processing,2016,70/71:756-768.
[40] 张方,秦远田. 工程结构动载荷识别方法[M]. 北京:国防工业出版社,2011.
[41] 许锋,陈怀海,鲍明. 机械振动载荷识别研究的现状与未来[J]. 中国机械工程,2002,13(6):526-531.
XU Feng,CHEN Huaihai,BAO Ming. Force identification for mechanical vibration: State-of-the-art and prospect[J]. China mechanical engineering,2002,13(6):526-531(in Chinese).
[42] 林家浩,智浩,郭杏林. 平稳随机振动荷载识别的逆虚拟激励法(一)[J]. 计算力学学报,1998,15(2):127-136.
LIN Jiahao, ZHI Hao, GUO Xinglin. Inverse pseudo excitation method for loading identification of stationary random vibration(1)[J]. Chinese journal of computational mechanics,1998,15(2):127-136(in Chinese).
[43] 智浩,郭杏林,林家浩. 平稳随机振动载荷识别逆虚拟激励法(二)[J]. 计算力学学报,1998,15(4):395-428.
ZHI Hao, GUO Xinglin, LIN Jiahao, Inverse pseudo excitation method for loading identification of stationary random vibration(2)[J]. Chinese journal of computational mechanics,1998,15(4):127-136(in Chinese).
[44] 毛玉明,郭杏林,赵岩,等. 基于灵敏度分析的结构动态载荷识别研究[J]. 振动与冲击,2010,29(10):1-3.
MAO Yuming,GUO Xinglin,ZHAO Yan,et al. Force identification based on sensitivity analysis method[J]. Journal of vibration and shock,2010,29(10):1-3(in Chinese).
[45] LEE B J,WHALEY P W. Prediction of the angular vibration of aircraft structures[J]. Journal of sound and vibration,1976,49(4):541-549.
[46] BAI C,WANG F,WAN G Y. Review of aircraft vibration environment prediction methods[J]. Procedia environmental sciences,2010,10:831-836.
[47] US DOD. Environmental engineering considerations and laboratory tests:MIL-STD-810H[S]. Washington DC:US DOD,2019.
[48] 张书明,纪敦. 机载设备振动环境实测和数据处理技术研究[C]//北京力学会第13届学术年会论文集. 北京:北京力学会,2007:174-175.
[49] 韩连平,李晓冲. 某型歼击机导弹发射装置振动环境测试和分析[C]//第十一届、第十二届和第十三届全国振动与噪声高技术及应用会议论文集. 北京:航空工业出版社,1999:400-404.
[50] 朱攀,贺敬. ARJ 21-700 飞机全机振动的测试与研究[J]. 中国科技信息,2014(8):65-66.
ZHU Pan,HE Jing. Vibration test and research of ARJ 21-700 aircraft[J]. China science and technology information,2014(8):65-66(in Chinese).
[51] 钟德均. 飞机振动预计方法修正研究[J]. 应用力学学报,2001,18(增刊1):207-209.
ZHONG Dejun. Thecorrection investigation of vibration prediction method of aircraft[J]. Chinese journal of applied mechanics,2001,18(S1):207-209(in Chinese).
[52] 王光芦,徐明,李大鹏,飞机飞行振动预计技术[J]. 航空工程进展,2010,1(3):251-255.
WANG Guanglu,XU Ming,LI Dapeng. Aircraft flight vibration prediction methodology[J]. Advances in aeronautical sicence and engineering,2010,1(3):251-255(in Chinese).
[53] 刘昭,徐俊,胡小兵. 基于深度置信网络的机载外挂振动预计方法[J]. 航空动力学报,2021,36(6):1197-1205.
LIU Zhao, XU Jun, HU Xiaobing. Vibration prediction method of aircraft external stores based on deep belief network[J]. Journal of aerospace power,2021,36(6):1197-1205(in Chinese).
[54] 田永卫,闫楚良,张书明,等. 飞机随机振动环境实测试验数据的归纳方法[J]. 振动、测试与诊断,2014,34(6):1129-1133.
TIAN Yongwei,YAN Chuliang,ZHANG Shuming,et al. Induction method of measured test data of aircraft random vibration environment[J]. Journal of vibration,measurement & diagnosis,2014,34(6):1129-1133(in Chinese).
[55] 霍文辉,刘伟. 载荷谱飞行实测振动环境谱数据处理研究[J]. 理论算法,2020(10):37-39.
HUO Wenhui,LIU Wei. Study on data processing of vibration environment spectrum of load spectrum in flight measurement[J]. Electronic test,2020(10):37-39(in Chinese).
[56] 熊俊江. 飞行器结构疲劳与寿命设计[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2004.
[57] 姚军,姚起杭. 结构随机振动响应的工程简化分析[J]. 应用力学学报,2002,19(1):103-105.
YAO Jun,YAO Qihang. A simple analysis method for random vibration response[J]. Chinese journal of applied mechanics,2002,19(1):103-105(in Chinese).
[58] 姚起杭,姚军. 结构振动疲劳问题的特点与分析方法[J]. 机械科学与技术,2000(增刊1):56-58.
YAO Qihang,YAO Jun. The behavior and analysis of structure vibration fatigue[J]. Mechanical sicence and technology,2000(S1):56-58(in Chinese).
[59] FUT T,CEBON D. Predicting fatigue lives for bi-modal stress spec-

tral densities[J]. International journal of fatigue,2000,22(1):11-21.
[60] 金奕山,李琳. 雨流循环均值-幅值二维联合概率密度的实用算法[J]. 振动与冲击,2003,22(4):54-57.
JIN Yishan,LI Lin. Practical algorithm for joint probability density function of rainflow ranges and means[J]. Journal of vibration and shock,2003,22(4):54-57(in Chinese).
[61] HALFPENNY A,林晓斌. 基于功率谱密度信号的疲劳寿命估计[J]. 中国机械工程,1998,9(11):16-19.
HALFPENNY A,LIN Xiaobin. Fatigue life pridiction based on signal of power spectrum density[J]. China mechanical engineering,1998,9(11):16-19(in Chinese).
[62] CHOW C L,LI D L. An analytical solution for fast fatigue assessment under wide-band random loading[J]. International journal of fatigue,1991,13(5):395-404.
[63] BENASCIUTTI D,TOVO R. Comparion of spectral methods for fatigue analysis in broad-band Gaussian random processes[J]. Probabilistic engineering mechanics,2006,21(4):287-299.
[64] 隋立军. 某型飞机进气道有限元应力及振动疲劳分析[J]. 航空计算技术,2014(4):26-28.
SUI Lijun. Vibrationfatigue analysis of aircraft inlet using FEM[J]. Aeronautical computing technique,2014(4):26-28(in Chinese).
[65] 陈群志,周志强,张强,等. 振动环境下飞机薄壁结构紧固件疲劳寿命研究[J]. 机械强度,2015,37(1):52-57.
CHEN Qunzhi,ZHOU Zhiqiang,ZHANG Qiang,et al. Study on fatigue life of thin-wall structure fasteners of aircraft[J]. Journal of mechanical strength,2015,37(1):52-57(in Chinese).
[66] 曹明红,邵闯,齐丕骞. 宽带随机振动疲劳寿命的频域分析与试验对比研究[J]. 机械科学与技术,2013,32(6):839-844.
CAO Minghong,SHAO Chuang,QI Piqian. Comparison of the frequency-domain analysis and the test Results for a wide-band random vibration fatigue problem[J]. Mechanical science and technology for aerospace engineering,2013,32(6):839-844(in Chinese).
[67] 李鹏,马君峰,王纯,等. 基于振动疲劳损伤分析的飞机壁板结构加筋参数优选[J]. 应用力学学报,2017,34(4):691-697.
LI Peng,MA Junfeng,WANG Chun,et al. Optimization of stiffened panel structure parameters based on vibration fatigue damage analysis[J]. Chinese journal of applied mechanics,2017,34(4):691-697(in Chinese).
[68] 王虎,王轲,赵丽茹. 基于非线性累积损伤的随机振动疲劳寿命分析[J]. 振动、测试与诊断,2018,38(5):991-996.
WANG Hu,WANG Ke,ZHAO Liru. Random vibration fatigue life analysis based on nonlinear cumulative damage[J]. Journal of vibration,measurement & diagnosis,2018,38(5):991-996(in Chinese).
[69] 白春玉,齐丕骞,牟让科,等. 基于经典 Von Mises 应力的多轴等效应力修正方法研究[J]. 振动与冲击,2015(23):166-170.
BAI Chunyu,QI Piqian,MU Rangke,et al. Multiaxial equivalent stress amendment algorithm based on classical Von Mises stress[J]. Journal of vibration and shock,2015(23):166-170(in Chinese).
[70] 白春玉,牟让科,马君峰,等. 多轴应力响应下结构振动疲劳寿命预估的时域方法研究[J]. 机械科学与技术,2013,32(2):289-293.
BAI Chunyu,MU Rangke,MA Junfeng,et al. Time domain analysis for the estimation of structure vibration fatigue life under multiaxial stress responses[J]. Mechanical science and technology for aerospace engineering,2013,32(2):289-293(in Chinese).
[71] 周航博. 基于临界面法的多轴频域随机振动疲劳研究[D]. 成都:西南交通大学,2018.
[72] 金南,陈怀海,贺旭东. 一种估计结构多轴随机振动疲劳寿命的临界平面法[J]. 国外电子测量技术,2019,38(4):1-6.
JIN Nan,CHEN Huaihai,HE Xudong. Critical plane method for evaluating the random vibration fatigue life of structures[J]. Foreign electronic measurement technology,2019,38(4):1-6(in Chinese).
[73] 祝耀昌,石鹏颉,程丛高,等. 军用飞机机载设备振动试验要求和有关问题的讨论(一):GJB 150. 16/16A 军用喷气式飞机和螺旋桨式飞机机载设备和外挂的振动试验要求及对比分析[J]. 航天器环境工程,2016,33(2):127-135.
ZHU Yaochang,SHI Pengzhe,CHENG Conggao,et al. The vibration testing requirements and related problems for military aircraft equipment(Ⅰ):Vibration testing requirements and comparison of airborne equipment and external hanging of military jet and propeller aircraft in GJB 150. 16/16A[J]. Spacecraft environment engineering,2016,33(2):127-135(in Chinese).
[74] 魏英魁,张晓颖,胡彦平. 大尺寸结构振动试验系统浅析[J]. 装备环境工程,2016,13(5):92-97.
WEI Yingkui,ZHANG Xiaoying,HU Yanping. Vibration test system for large dimension structure[J]. Equipment environmental engineering,2016,13(5):92-97(in Chinese).
[75] 范真,李平,宦海祥,等. 振动环境试验设备与技术的现状及进展[J]. 机械设计与制造,2006(10):164-165.
FAN Zhen,LI Ping,HUAN Haixiang,et al. Development of technology and equipment of vibration environment testing[J]. Machinery disgn and manufacture,2006(10):164-165(in Chinese).
[76] 蒋瑜,陶俊勇. 结构振动疲劳加速试验技术研究[J]. 装备环境工程,2016,13(5):30-35.
JIANG Yu,TAO Junyong. Accelerated vibration fatigue testing of sructures[J]. Equipment environmental engineering,2016,13(5):30-35(in Chinese).
[77] 张治君,成竹,王琦,等. 热振联合环境试验技术研究[J]. 实验力学,2013,28(4):529-535.
ZHANG Zhijun,CHENG Zhu,WANG Qi,et al. Experimental technology study for thermo-vibration united environment[J]. Journal of experimental mechanics,2013,28(4):529-535(in Chinese).
[78] HABTOUR E,CONNON W S. POHLAND M F,et al. Review of re-

sponse and damage of linear and nonlinear systems under multiaxial vibration[J]. Shock and vibration,2014,2:1-21.

[79] 李奇志. 环境振动试验若干技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2013.

[80] CHANG K Y,FRYDMAN A M. Three-dimensional random vibration testing definition and simulation[C]//Proceedings of the Institute of Environmental Sciences. New Orleans,LA:[s. n],1990:129-139.

[81] FREEMAAN M T. 3-axi vibration test system simulates real word [J]. Test engineering and management,1990,91:10-14.

[82] WHITEMAN W E. Inadequacies in uniaxial stress screen vibration testing[J]. Journal of the test,2001,44(4):20-23.

[83] 陈家焱,王海东,周建川,等. 多点激励振动试验控制技术进展[J]. 振动与冲击,2011,30(3):69-73.
CHEN Jiayan,WANG Haidong,ZHOU Jianchuan,et al. Progress in multi-exciter vibration testing control technology[J]. Journal of vibration and shock,2011,30(3):69-73(in Chinese).

[84] 王伟. 三轴向振动试验系统及其关键技术研究[D]. 杭州:浙江大学,2017.

[85] 孙建勇,徐明,魏媛,等. 多轴向振动试验类型及试验实施技术探讨[J]. 环境试验,2014(6):5-10.
SUN Jianyong,XU Ming,WEI Yuan,et al. Discussion on the test types and the technology of implementation of multi-axial vibration test[J]. Environmental technology,2014(6):5-10(in Chinese).

[86] 邱汉平,冯咬齐,樊世超. 多轴随机振动试验控制技术研究[J]. 航天器环境工程,2015,32(5):527-531.
QIU Hanping,FENG Yaoqi,FAN Shichao. The multi-axis random vibration test control techniques[J]. Spacecraft environment engineering,2015,32(5):527-531(in Chinese).

[87] 魏巍. 冗余多轴振动台耦合特性分析及其控制策略研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.

[88] MORIOKA M,GRIFFIN M J. Magnitude-dependence of equivalent comfort contours for fore-and-aft,lateral and vertical hand-transmitted vibration[J]. Journal of sound and vibration,2006,295(3):633-648.

[89] MORIOKA M,GRIFFIN M J. Magnitude-dependence of equivalent comfort contours for fore-and-aft,lateral,and vertical vibration at the foot for seated persons[J]. Journal of sound and vibration,2010,329(14):2939-2952.

[90] HUANG Y,GRIFFIN M J. The relative discomfort of noise and vibration:effects of stimulus duration[J]. Ergonomics,2014,57(8):1244-1255.

[91] ZANG X,QIU Y,GRIFFIN M J. Transmission of vertical vibration through a seat:Effect of thickness of foam cushions at the seat pan and the backrest[J]. International journal of industrial ergonomics,2015,48:36-45.

[92] International Organization for Standardization. Mechanical vibration and shock:Evaluation of human exposure to whole-body vibration:Part 1 general requirements:ISO 2631-1:1997[S]. Geneva:International Organization for Standardization,1997.

[93] 国家市场监督管理总局. 机械振动与冲击人体暴露于全身振动的评价:GB/T 13441.1-2007[S]. 北京:全国机械振动、冲击与状态监测标准化技术委员会,2007.

[94] CILOGLU H,ALZIADEH M A,MOHANY H. Assessment of the whole body vibration exposure and the dynamic seat comfort in passenger aircraft[J]. International journal of industrial ergonomics,2015,45:116-123.

[95] DEMIĆ M,LUKIĆ J,MILIĆ Ž. Some aspects of the investigation of random vibration influence on ride comfort[J]. Journal of sound and vibration,2002,253(5):109-128.

[96] NISHIYAMA S,UESUGI N,TAKESHIMA T,et al. Research on vibration characteristics between hunman body and seat,steering wheel,and pedals(effectss of seat position on ride comfort)[J]. Journal of sound and vibration,2000,236(9):1-21.

[97] MOHAJER N,ABDI H,NAHAVANDI S,et al. Directional and sectional ride comfort estimation using an integrated human biomechanical-seat foam model[J]. Journal of sound and vibration,2017,403(9):38-58.

[98] MELLERT V,BAUMANN I,FREESE N,et al. Impact of sound and vibration on health,travel comfort and performance of flight attendants and pilots[J]. Aerospace science and technology,2008,12(1):18-25.

[99] 唐传茵. 汽车振动舒适性评价研究[J]. 振动与冲击,2008,27(9):158-161.
TANG Chuanyin. Evaluation of ride comfort of a vehicle[J]. Journal of vibration and shock,2008,27(9):158-161(in Chinese).

[100] 马思群,王猛,王晓杰,等. 高速列车平稳性与乘坐舒适度测试及评价[J]. 大连交通大学学报,2015,36(增刊1):66-68.
MA Siqun,WANG Meng,WANG Xiaojie,et al. Evaluation and measurement of high speed train by ride comfort and ride index [J]. Journal of Dalian Jiaotong University,2015,36(S1):66-68 (in Chinese).

[101] LI D,HUANNG Y. The discomfort model of the micro commercial vehicles interior noise based on the sound quality analyses[J]. Applied acoustics,2018,132(3):223-231.

[102] MANSFIELDN J,MAEDA S. Comparison of the apparent masses and cross-axis apparent masses of seated humans exposed to single- and dual-axis whole-body vibration[J]. Journal of sound and vibration,2006,298(3):841-853.

[103] 李晓玲,张翔,张鄂,等. 用肌电信号评价人体振动舒适性的方法研究[J]. 西安交通大学学报,2009,43(3):22-26.
LI Xiaoling,ZHANG Xiang,ZHANG E,et al. Evaluation of human body to vibration comfortableness by surface electromyogram signals[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2009,43(3):22-26 (in Chinese).

[104] 支开印,周军,李连刚,等. 装载机座椅振动舒适性分析与评价方法[J]. 工程机械,2010,41(8):13-17.
ZHI Kaiyin,ZHOU Jun,LI Liangang,et al. Method to analysis and

evaluate vibration comfort for loaders seats[J]. Construction machinery and equipment,2010,41(8):13-17(in Chinese).

[105] 彭波. 铁道客车振动舒适性虚拟试验研究[J]. 铁路计算机应用,2013,22(12):15-17.
PENG Bo. Research on virtual test for vibration comfort of railway passenger vehicle [J]. Railway computer application, 2013, 22 (12):15-17(in Chinese).

[106] 李凯翔,张飞. 基于人体主观振动舒适性的飞机结构减振设计研究[J]. 应用力学学报,2021,38(2):839-843.
LI Kaixiang, ZHANG Fei. Structural vibration attenuation design based on human subjective assessment[J]. Chinese journal of applied mechanics,2021,38(2):839-843(in Chinese).

[107] 张飞,李凯翔,周江贝. 某型飞机客舱座椅人体振动舒适性评价研究[J]. 强度与环境,2019,46(4):59-63.
ZHANG Fei, LI Kaixiang, ZHOU Jiangbei. Evaluation on human body vibration comfort of aircraft cabin seat[J]. Structure and environment engineering,2019,46(4):59-63(in Chinese).

[108] 代承霖,李凯翔,牟让科. 飞机客舱人体振动舒适性评估方法研究[J]. 应用力学学报,2021,38(3):1226-1231.
DAI Chenglin, LI Kaixiang, MU Rangke. Research on evaluation method of human body vibration comfort in aircraft cabin[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2021, 38 (3): 1226-1231 (in Chinese).

[109] 魏宇宏,骆利民. 阻尼减振技术在某型飞机短舱尾罩裂纹中的应用[J]. 装备环境工程,2020,17(2):77-80.
WEI Yuhong, LUO Limin. Application ofdamping vibration absorbing technology on the nacelle tail cone of a specific type of aircraft [J]. Equipment environmental engineering, 2020, 17 (2): 77-80 (in Chinese).

[110] 贺红林,周楠兰,刘文光,等. 黏弹性阻尼板结构减振动力学特性分析与优化[J]. 计算机仿真,2015,32(7):203-207.
HE Honglin, ZHOU Nanlan, LIU Wenguang, et al. Analysis of vibration suppression characteristics of plank structure layered by visco-elastic damping materials[J]. Computer simulation,2015,32 (7):203-207(in Chinese).

[111] 孙亚飞,陈仁文,徐志伟,等. 应用粘弹阻尼材料的飞机座舱振动噪声控制实验研究[J]. 机械科学与技术,2003,22(3):480-483.
SUN Yafei, CHEN Renwen, XU Zhiwei, et al. Experimental research on vibration and noise control of the fighter cockpit using viscoelastic damping materials [J]. Mechanical science and technology,2003,22(3):480-483(in Chinese).

[112] 王明旭,陈国平. 基于变密度方法约束阻尼层动力学性能优化[J]. 南京航空航天大学学报,2010,42(3):283-287.
WANG Mingxu, CHEN Guoping. Dynamics performance optimization of constrained damping layer using variable density method [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronaustics, 2010,42(3):283-287(in Chinese).

[113] 张彩霞,沙云东,朱琳,等. 薄壁结构约束阻尼板减振降噪优化设计[J]. 沈阳航空航天大学学报,2014,31(3):32-38.
ZHANG Caixia, SHA Yundong, ZHU Lin, et al. Optimization design of thin-walled structure with constrained damping layer[J]. Journal of Shenyang Aerospace University,2014,31(3):32-38(in Chinese).

[114] 尹绪超,褚夫强,渠鸿飞. 阻尼加强筋板架减振性能试验研究[J]. 材料开发与应用,2014,29(2):22-26.
YIN Xuchao, CHU Fuqiang, QU Hongfei. Experimental study on the stiffened panels with constrained layer damping treatments[J]. Development and application of materials,2014,29(2):22-26(in Chinese).

[115] 史文欣,刘仲宇,王平,等. 航空光电吊舱隔振器布局方式分析[J]. 激光与红外,2018,48(8):1027-1030.
SHI Wenxin, LIU Zhongyu, WANG Ping, et al. Analysis onvibration isolator layout of aerial optical-electronic pod[J]. Laser & infrared,2018,48(8):1027-1030(in Chinese).

[116] 季凡渝,施冠军,孙俊,等. 多向安装隔振器的研究与应用[J]. 电子机械工程,2012,28(3):12-15.
JI Fanyu, SHI Guanjun, SUN Jun, et al. Research and application of multi-directional installation vibration isolator [J]. Electro-mechanical engineering,2012,28(3):12-15(in Chinese).

[117] 王进强,沈星,李杰锋. 基于 SMA 的可变频隔振器设计与实验研究[J]. 振动与冲击,2017,36(20):59-63.
WANG Jinqiang, SHEN Xing, LI Jiefeng. A design and experimental research of a frequency tunable vibration isolator based on SMA [J]. Journal of vibration and shock,2017,36(20):59-63(in Chinese).

[118] 余慕春,李炳蔚,牛智玲,等. 基于剪切增稠液体的变阻尼隔振器动力学特性研究[J]. 装备环境工程,2019,16(8):33-38.
YU Muchun, LI Bingwei, NIU Zhiling, et al. Dynamical properties of variable-damped vibration isolator based on shear thickening fluid[J]. Equipment environmental engineering,2019,16(8):33-38 (in Chinese).

[119] 苏渤,董万元. 直升机机载设备隔振设计方法[J]. 中国科技信息,2020(6):28-30.
SU Bo, DONG Wanyuan. Design method of vibration isolation of helicopter airborne equipment [J]. China science and technology information,2020(6):28-30(in Chinese).

[120] 李鹏,李凯翔,马君峰,等. 起落架舱声场激励下的客舱地板减振设计研究[J]. 应用力学学报,2019,36(1):137-142.
LI Peng, LI Kaixiang, MA Junfeng, et al. Vibration reduction design of cabin floor under the acoustic excitation in landing gear cabin[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2019, 36 (1): 137-142(in Chinese).

[121] 付涛. 复合夹层筋板结构声振特性分析及抑制研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.

[122] 郑文. 基于胞映射的动力吸振器的多目标优化[D]. 天津:天津大学,2016.

[123] 韩锋. 多频动力吸振器优化设计技术研究[D]. 南京:南京航

空航天大学,2014.

[124] 魏榕祥,陈国平,黄瑞泉,等. 动力吸振器抑制某型飞机平尾振动的设计与试验研究[J]. 南京航空航天大学学报,2010,42(3):307-312.
WEI Rongxiang, CHEN Guoping, HUANG Ruiquan, et al. Design and experiments of dynamic absorber for aircraft tailplane[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010,42(3):307-312(in Chinese).

[125] KASSEM M, YANG Z, GU Y, et al. Active dynamic vibration absorber for flutter suppression[J]. Journal of sound and vibration, 2020,469(3):1-18.

[126] KASSEM M, YANG Z, GU Y, et al. Modeling and control design for flutter suppression using active dynamic vibration absorber[J]. Journal of vibration engineering & technologies, 2021,9:845-860.

[127] ZHOU J, XU M, YANG Z, et al. Suppression of panel flutter response in supersonic airflow using a nonlinear vibration absorber[J]. International journal of non-linear mechanics, 2021,133(7):103714.

[128] 丁昌林,董仪宝,赵晓鹏. 声学超材料与超表面研究进展[J]. 物理学报,2018,67(19):144-158.
DING Changlin, DONG Yibao, ZHAO Xiaopeng. Research advances in acoustic metamaterials and metasurface[J]. Acta physica Sinica, 2018,67(19):144-158(in Chinese).

[129] 田源,葛浩,卢明辉,等. 声学超构材料及其物理效应的研究进展[J]. 物理学报,2019,68(19):1-12.
TIAN Yuan, GE Hao, LU Minghui, et al. Research advances in acoustic metamaterials[J]. Acta physica Sinica, 2019,68(19):1-12(in Chinese).

[130] 季宏丽,黄薇,裘进浩,等,声学黑洞结构应用中的力学问题[J]. 力学进展,2017,47(1):333-384.
JI Hongli, HUANG Wei, QIU Jinhao, et al. Mechanics problems in application of acoustic black hole structures[J]. Advances in mechanics, 2017,47(1):333-384(in Chinese).

[131] 翟太珍. 飞机加筋壁板结构压电主/被动控制系统的研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2010.

[132] 刘健. 基于惯性作动器结合 PID 控制器实现结构振动主动控制[D]. 南昌:南昌航空大学,2017.

[133] 陆洋,顾仲权,凌爱民,等. 直升机结构响应主动控制飞行试验[J]. 振动工程学报,2012,25(1):24-29.
LU Yang, GU Zhongquan, LING Aimin, et al. Flight test of active control of structure response for helicopter[J]. Journal of vibration engineering, 2012,25(1):24-29(in Chinese).

[134] 王晓宇,王浩威,闫雪梅,等. 空间柔性天线展开臂的半主动振动控制研究[J]. 机械工程学报,2020,56(5):116-122.
WANG Xiaoyu, WANG Haowei, YAN Xuemei, et al. Semi-active vibration suppression of space flexible antenna arm[J]. Journal of mechanical engineering, 2020,56(5):116-122(in Chinese).

[135] JI H L, QIU J H, WU Y P, et al. Semi-active vibration control based on synchronously switched piezoelectric actuators[J]. International journal of applied electromagnetics and mechanics, 2018, 59(1):1-9

[136] JI H L, GUO Y, QIU J H, et al. A new design of unsymmetrical shunt circuit with negative capacitance for enhanced vibration control[J]. Mechanical systems and signal processing, 2021,155(6):107576.

[137] 石博文,季宏丽,裘进浩,等. 用自适应滤波及同步开关阻尼技术的超低频振动半主动控制器[C]//第十二届全国振动理论及应用学术会议. 南宁:广西大学,2017:1-9.

[138] 高乐. 基于压电智能复合材料的振动主动控制[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.

[139] 廉晶晶. 基于光致伸缩驱动器的梁结构振动主动控制研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2012.

[140] CHEN Y, VIRESH W, ZIMCIK D. Development and verification of real-time controllers for F/A-18 vertical fin buffet load alleviation[J]. Physica A: Statistical mechanics and its applications, 2006, 6173:1-12.

[141] PARADIES R, CIRESA P. Active wing design with integrated flight control using piezoelectric macro fiber composites[J]. Smart materials and structures, 2009,18(3):1-9.

[142] STRAUB F K, ANAND V R, BIRCHETTE T S, et al. Active flap control of the smart rotor for vibration reduction[C]//Proceedings of the American Helicopter Society 65th Annual Forum and Technology Display. Grapevine, TX: American Helicopter Society, 2009:20090036805.

[143] TARAZAGA P A, LNMAN D J. Control of a space rigidizable inflatable boom using macro-fiber composite actuators[J]. Journal of vibration and control, 2007,13(7):935-950.

[144] VIGNAL B, KRYSINSKI T. Development and qualification of active vibration control system for the Eurocopter EC225/EC725[C]//Proceedings of the 61st Annual Forum of the American Helicopter Society. Grapevine: American Helicopter Society, 2005.

[145] SHIRK M, HERTZ T J, EAISSHAAR T A. Aeroelastic tailoring theory, pratice, and promise[J]. Journal of aircraft, 1986,23(1):6-18.

[146] 杨军,常楠,甘学东,等. 复材机翼气弹特性工程化设计分析技术[J]. 航空学报,2020,41(6):523477.
YANG Jun, CHANG Nan, GAN Xuedong, et al. Engineering design and analysis technique of aeroelastic characteristics of composite wing[J]. Acta aeronautica et astronautica Sinica, 2020,41(6):523477(in Chinese).

[147] WERTER N, DE BREUKER R. A novel dynamic aeroelastic framework for aeroelastic tailoring and structural optimisation[J]. Composite structures, 2016,158:369-386.

[148] DE LEOND M, DE SOUZA C E, FONSECA J S O, et al. Aeroelastic tailoring using fiber orientation and topology optimization[J]. Structural and multidisciplinary optimization, 2012,46:663-677.

[149] GEORGIOU G, VIO G A, COOPER J E. Aeroelastic tailoring and scaling using bacterial foraging optimisation[J]. Structural and

multidisciplinary optimization,2014,50(1):81-99.

[150] 段世慧,刘刚,孙侠生,等. 飞机结构多层次优化设计技术及COMPASS[J]. 强度与环境,2010,37(1):22-29.
DUAN Shihui,LIU Gang,SUN Xiasheng,et al. A multi-level optimization design technology for aeronautical structure in COMPASS [J]. Structure & environment engineering,2010,37(1):22-29(in Chinese).

[151] 刘湘宁,向锦武. 大展弦比柔性复合材料机翼的气动弹性剪裁[J]. 北京航空航天大学学报,2006,32(12):1403-1407.
LIU Xiangning, XIANG Jinwu. Study of aeroelastic tailoring of high-aspect-ratio flexble composite wing[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2006,32(12):1403-1407(in Chinese).

[152] CHRISTINE V J. Aeroelastic tailoring of the NASA common research model via novel material and structural configurations [C]//Proceedings of the 52nd Aerospace Sciences Meeting. Maryland:AIAA,2014:13-17.

[153] LUKASZEWICZ D, WARD C, POTTER K. The engineering aspects of automated prepreg layup: history, present and future[J]. Composite:Part B,2012,43:997-1009.

[154] STODIECK O,COOPER J E,WEAVER P M. Aeroelastic tailoring of a representative wing box using tow-steered composites[J]. AIAA journal,2017,55(4):1425-1439.

[155] BRET K S,CHRISTINE V J. Comparison of curvilinear stiffeners and tow steered composites for aeroelastic tailoring of aircraft wings [J]. Computers and structures,2017,183:48-60.

[156] DOUGLAS D P,CAROLYN M. Statistical methods for rapid aerothermal analysis and design technology: Validation, NASA NAG1-02030[R]. Hampton:NASA,2003.

[157] BLEVINS R D,BOFILIOS D,HOLEHOUSE I,et al. Thermo-vibro-acoustic loads and fatigue of hypersonic flight vehicle structure: AFRL-RB-WP-TR-2009-3139 [R]. Chula Vista, CA: Goodrich Aerostructures Group,2009.

[158] TZONG G,JABOBS R,LIGUORE S. Air vehicle integration and technology research (AVIATR) task order 0015: Predictive capability for hypersonic structural response and life prediction: Phase 1-identification of knowledge gaps, volume 1-nonproprietary version [R]. Huntington Beach:The Boeing Company,2010.

[159] 邹元杰,韩增尧,张瑾. 航天器全频域力学环境预示技术研究进展[J]. 力学进展,2012,42(4):445-454.
ZOU Yuanjie, HAN Zengyao, ZHANG Jin. Research progresson full-frequency prediction techniques of spaceraft's mechnical environment[J]. Advances in mechanics,2012,42(4):445-454(in Chinese).

[160] 杨彦广,李明,李中华,等. 高超声速飞行器跨流域气动力/热预测技术研究[J]. 空气动力学学报,2016,34(1):5-13.
YANG Yanguang,LI Ming,LI Zhonghua,et al. Aerodynamic force/heating measurement on hypersonic vehicle across different flow regions[J]. Acta aerodynamica Sinica,2016,34(1):5-15(in Chinese).

[161] 陈坚强,张益荣,张毅锋,等. 高超声速气动力数据天地相关性研究综述[J]. 空气动力学学报,2014,32(5):587-599.
CHEN Jianqiang,ZHANG Yirong,ZHANG Yifeng,et al. Review of correlation analysis of aerodynamic data between flight and ground prediction for hypersonic vehicle[J]. Acta aerodynamica Sinica, 2014,32(5):587-599(in Chinese).

[162] 张子健,刘云峰,姜宗林. 振动激发对高超声速气动力/热影响[J]. 力学学报,2017,49(3):616-626.
ZHANG Zijian, LIU Yunfeng, JIANG Zonglin. Effect of vibration excitation on hypersonic aerodynamic and aerothermodynamic[J]. Chinese journal of theoretical and applied mechanics, 2017, 49 (3):616-626(in Chinese).

[163] HUDSON L, STEPHENS C. X-37 C/SiC ruddervator subcomponent test program [C]//Proceedings of the National Aeronautics and Space Administration 2009 Annual Meeting. Hampton: NASA,2009.

[164] STEPHENS C,HUDSON L,PIAZZA A. Overview of an advanced hypersonic structural concept test program: NASA-2008-561[R]. Hampton:NASA,2008.

[165] 吴大方,林鹭劲,吴文军,等. 1 500 ℃极端高温环境下高超声速飞行器轻质隔热材料热/振联合试验[J]. 航空学报,2020, 41(7):223612.
WU Dafang,LIN Lujin,WU Wenjun,et al. Thermal/vibration test of lightweight insulation material for hypersonic vehicle under extreme-high-temperature environment up to 1 500 ℃[J]. Acta aeronautica et astronautica Sinica,2020,41(7):223612(in Chinese).

[166] 吴振强,任方,张伟,等. 飞行器结构热噪声试验的研究进展[J]. 导弹与航天运载技术,2010(2):24-30.
WU Zhenqiang,REN Fang,ZHANG Wei,et al. Research advances in thermal-acoustic testing of aerocraft structures[J]. Missiles and sace vehicles,2010(2):24-30(in Chinese).

[167] 王晓飞,王圣刚,麻连净. 一种典型 C/SiC 构型件的热噪声适应性试验研究[J]. 航天器环境工程,2021,38(1):46-49.
WANG Xiaofei,WANG Shenggang,MA Lianjing. Experimental research of thermal-acoustic adaptability of a typically-configured C/SiC specimen [J]. Spacecraft environment engineering, 2021, 38 (1):46-49(in Chinese).

[168] 邹学锋,郭定文,潘凯,等. 综合载荷环境下高超声速飞行器结构多场联合强度试验技术[J]. 航空学报, 2018, 39 (12):222326.
ZOU Xuefeng,GUO Dingwen,PAN Kai,et al. Test technique for multi-load combined strength of hypersonic vehicle structure under complex loading environment[J]. Acta aeronautica et astronautica Sinica,2018,39(12):222326(in Chinese).

[169] GIRARD F,BATTUELLO M,FLORIO M. Multiwavelength thermometry at high temperature: Why it is advantageous to work in the uviolet[J]. International journal of thermophysics,2014,35(6/7): 1401-1413.

[170] RAHMATABADI D, SHAHMIRZALOO A, FARAHANI M, et al. Characterizing the elastic and plastic properties of the multilayered Al/Brass composite produced by ARB using DIC[J]. Materials science and engineering: A, 2019, 753: 70-78.

[171] 荆甫雷,张常贤,王希影,等. 涡轮叶片应变/温度非接触同步测试技术分析[J]. 航空动力, 2020(6): 35-38.
JING Pulei, ZHANG Changxian, WANG Xiying, et al. Non-contact synchronous testing technology for turbine blade strain/temperature [J]. Aerospace power, 2020(6): 35-38(in Chinese).

[172] 王楠楠,师钰璋,王高,等. 蓝宝石光纤高温测量技术进展[J]. 计测技术, 2018, 38(6): 61-68.
WANG Nannan, SHI Yuzhang, WANG Gao, et al. Review of high temperature measurement with sapphire monocrystalline fiber[J]. Metrology & measurement technology, 2018, 38(6): 61-68(in Chinese).

[173] 宝剑光,秦强,柴葳,等. 基于非接触法的 1 200 ℃高温应变测试技术研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(6): 117-121.
BAO Jianguang, QIN Qiang, CHAI Wei, et al. Study of non-contract metrology for deformation measurement at 1 200 ℃[J]. Science technology and engineering, 2017, 17(6): 117-121(in Chinese).

[174] 符泰然,赵桓,曾俊,等. 基于不确定度的辐射测温优化分析[J]. 热科学与技术, 2010, 9(3): 270-277.
FU Tairan, ZHAO Huan, ZENG Jun, et al. Some considerations of pyrometry optimization based on measurement uncertainties[J]. Journal of thermal science and technology, 2010, 9(3): 270-277 (in Chinese).

[175] 潘兵,吴大方,高镇同,等. 1 200 ℃高温热环境下全场变形的非接触光学测量方法研究[J]. 强度与环境, 2011, 38(1): 52-59.
PAN Bing, WU Dafang, GAO Zhentong, et al. Study of non-contact optical metrology for full-field deformation measurement at 1 200 ℃[J]. Structure & environment engineering, 2011, 38(1): 52-59 (in Chinese).

[176] SUCHEENDRAN M M, BODONY D J, GEUBELLE P H. Coupled structural-acoustic response of a duct-mount-ed elastic plate with grazing flow[J]. AIAA journal, 2014, 52(1): 178-194.

[177] MALAEKZADEH P, SHAHPARI S A, ZIAEE H R. Three-dimensional free vibration of thick functionally graded annular plates in thermal environment[J]. Journal of sound and vibration, 2010, 329 (4): 425-442.

[178] LIGUORES L, THOMAS M J, PITT D M. Application and demonstration of nonlinear reduced order modeling (NLROM) for thermal/acoustic response [C]//Proceedings of the 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Honoululu: AIAA, 2012.

[179] PRZEKOP A, RIZZI S A, WEITZER K A. An investi-gation of high-cycle fatigue models for metallic structures exhibiting snap-through response[J]. International journal of fatigue, 2008, 30 (9): 1579-1598.

[180] DECHAUMPHAI P, THORNTON E A, WIETING A R. Flow-thermal-structural study of aerodynamically heat-ed leading edges[J]. Journal of spacecraft and rockets, 1989, 26(4): 201-209.

[181] BEHNKEM N, SHRMA A, PRZEKOP A, et al. Thermal-acoustic analysis of a metallic integrated thermal protection system structure [C]//Proceedings of the 51st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Orlando: AIAA, 2010.

[182] BLADESE L, MISKOVISH R S, NUCCI M. Towards a coupled mutliphysics analysis capability for hypersonic vehicle structures [C]//Proceedings of the 52nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Denver: AIAA, 2011.

[183] SHA Yundong, ZHANG Mohan, ZHAO Fengtong, et al. Nonlinear response analysis and test verification for thin-walled structures to thermal – acoustic loads[J]. Acta aeronautica et astronautica Sinica, 2019, 40(4): 193-204(in Chinese).

[184] 贺尔铭,陈兵,张忠,等. 考虑后屈曲的 2D C/SiC 复合材料板热振动分析[J]. 强度与环境, 2016, 43(4): 49-56.
HE Erming, CHEN Bing, ZHANG Zhong, et al. Modal analysis of 2D C/SiC composite panels in thermal environment considering post buckling[J]. Structure and environment engineering, 2016, 43 (4): 49-56(in Chinese).

[185] 杨雄伟,李跃明,耿谦. 基于混合 FE-SEA 法的高温环境飞行器宽频声振特性分析[J]. 航空学报, 2011, 32(10): 1851-1859.
YANG Xiongwei, LI Yueming, GENG Qian. Broadband vibro-acoustic response of aircraft in high temperature environment based on hybrid FE-SEA[J]. Actaaeronautica et astronautica Sinica, 2011, 32(10): 1851-1859(in Chinese).

[186] 沙云东,魏静,高志军,等. 热声激励下金属薄壁结构的随机疲劳寿命估算[J]. 振动与冲击, 2013, 32(10): 162-166.
SHA Yundong, WEI Jing, GAO Zhijun, et al. Random fatigue life prediction of metallic thin-walled structures under thermo-acoustic excitation[J]. Journal of vibration and shock, 2013, 32(10): 162-166(in Chinese).

[187] 张正平. 飞行器薄壁结构热噪声响应及动强度研究[J]. 强度与环境, 2019, 46(1): 1-7.
ZHANG Zhengping. Dynamic response and strength of aerocraft thin-panel under thermal-acoustic loads[J]. Structure and environment engineering, 2019, 46(1): 1-7(in Chinese).

[188] 周印佳,孟松鹤,解维华,等. 高超声速飞行器热环境与结构传热的多场耦合数值研究[J]. 航空学报, 2016, 37(9): 2739-2748.
ZHOU Yinjia, MENG Songhe, XIE Weihua, et al. Multi-field coupling numerical analysis of aerothermal environment and structural heat transfer of hypersonic vehicles[J]. Acta aeronautica et astronautica Sinica, 2016, 37(9): 2739-2748(in Chinese).

[189] 杨智春,刘丽媛,王晓晨. 高超声速飞行器受热壁板的气动弹

性声振分析[J]. 航空学报,2016,37(12):3578-3587.
YANG Zhichun, LIU Liyuan, WANG Xiaochen. Analysis of aeroelastic vibro-acoustic response for heated panel of hypersonic vehicle[J]. Acta aeronautica evtastronautica Sinica, 2016, 37(12): 3578-3587(in Chinese).

[190] 桂业伟,刘磊,代光月,等. 高超声速飞行器流-热-固耦合研究现状与软件开发[J]. 航空学报,2017,38(7):020844.
GUI Yewei, LIU Lei, DAI Guangyue, et al. Research status of hypersonic vehicle fluid-thermal-solid coupling and software development[J]. Acta aeronautica et astronautica Sinica, 2017, 38(7): 020844(in Chinese).

[191] 邹学锋,郭定文,张昕,等. 声/热/静联合载荷下钛板结构响应特性研究[J]. 推进技术,2019,40(5):1136-1143.
ZOU Xuefeng, GUO Dingwen, ZHANG Xin, et al. Study on response characteristcs of titanium panel under combined thermal/acoustic/static loadings[J]. Journal of proulsion technology, 2019, 40(5):1136-1143(in Chinese).

[192] 叶洁. 美国高超声速飞行器技术发展初步研究[J]. 飞航导弹, 2014(8):15-20.
YE Jie. A preliminary study on the development of hypersonic vehicles in the United States[J]. Aerodynamic missile journal, 2014(8):15-20(in Chinese).

[193] BISPLINGHOFF R L. Somes tructural and aeroelastic considerations of high-speed flight[J]. Journal of the aerospace scrences, 1956, 23(4):289-329.

[194] RODGERS J. Aerothermoelastic analysis of a NASP-like vertical fin[C]//Proceedings of the 33rd Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Dallas: AIAA, 1992.

[195] DAVIS M, WHITE J. X-43A flight-test-determined aerodynamic force and moment characteristics at Mach 7.0[J]. Journal of spacecraft and rockets, 2008, 45:472-484.

[196] MCNAMARA J J, FRIEDMANN P P. Aeroelastic and aerothermoelastic analysis of hypersonic vehicles: Current status and future trends[C]//Proceedings of the 48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Honolulu: AIAA, 2007.

[197] MCNAMARA J J, FRIEDMANN P P. Aeroelastic and aerothermoelastic analysis in hypersonic flow: past, present, and future[J]. AIAA journal, 2011, 49(6):1089-1122.

[198] TRAN H, FARHAT C. An integrated platform for the simulation of fluid-structure-thermal interaction problems[C]//Proceedings of the 43rd AIAA Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Denver: AIAA, 2002:1307.

[199] 吴志刚,惠俊鹏,杨超. 高超声速下翼面的热颤振工程分析[J]. 北京航空航天大学学报,2005,31(3):270-273.
WU Zhigang, HUI Junpeng, YANG Chao. Hypersonic aerothermoelastic analysis of wings[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31(3): 270-273(in Chinese).

[200] THORNTON E, DECHAUMPHAI P. Coupled flow, thermal, and structural analysis of aerodynamically heated panels[J]. Journal of aircraft, 1988, 25(11):1052-1058.

[201] CULLER A J, MCNAMARA J J. Impact of fluid-thermal-structural coupling on response prediction of hypersonic skin panels[J]. AIAA journal, 2011, 49(11):2393-2406.

[202] YANG C, LI G S, WAN Z Q. Aerothermal-aeroelastic two-way coupling method for hypersonic curved panel flutter[J]. Science in China series E: Technological science, 2012, 55(3):831-840.

[203] 陈浩. 气动热弹性建模及分析方法研究[D]. 西安:西北工业大学,2019.

[204] LIGHTHILL M J. Oscillating airfoils at high mach numbers[J]. Journal of theaeronautical sciences, 1953, 20(6):402-406.

[205] ASHLEY H, ZARTARIAN G. Piston theory-a new aerodynamic tool for the aeroelastician[J]. Journal of the aeronautical sciences, 1956, 23(12):1109-1118.

[206] MORGAN H G, RUNYAN H L, HUCKEL V. Theoretical considerations of flutter at high mach numbers[J]. Journal of the aeronautical sciences, 1958, 25(6):371-381.

[207] YATES E C, BENNETT R M. Analysis of supersonic-hypersonic flutter of lifting surfaces at angle of attack[J]. Journal of aircraft, 1972, 9(7):481-489.

[208] ADAM J, CULLER, MCNAMARA J J. Studies on fluidthermal-structural coupling for aerothermoelasticity in hypersonic flow[J]. AIAA journal, 2010, 48(8):1721-1723.

[209] 谢丹,冀春秀,景兴建. 高超声速典型弹道下的壁板热气动弹性动力学分析[J]. 航空学报,2021,42(11):368-383.
XIE Dan, JI Chunxiu, JING Xingjian. Studies on two-way coupling for aerothermoelasticity in typical trajectory[J]. Acta aeronautica et astronautica Sinica, 2021, 42(11):368-383(in Chinese).

[210] YAO Z X, LIU D D. From piston theory to unified hypersonic-supersonic lifting surface method[J]. Journal of aircraft, 1997, 34(3):304-312.

[211] 张伟伟,夏巍,叶正寅. 一种高超音速热气动弹性数值研究方法[J]. 工程力学,2006,23(2):41-46.
ZHANG Weiwei, XIA Wei, YE Zhengyin. A numerical method for hypersonic aerothermoelasticity[J]. Engineering mechanics, 2006, 23(2):41-46(in Chinese).

[212] MCNAMARA J J, CROWELL A R, FRIEDMANN P P, et al. Approximate modeling of unsteady aerodynamics for hypersonic aeroelasticity[J]. Journal of aircraft, 2010, 47(6):1932-1945.

[213] LAMORTE N, FRIEDMANN P P. Aerothermoelastic and aeroelastic studies of hypersonic vehicles using CFD[C]//Proceedings of the 54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Boston: AIAA, 2013.

[214] CROWELL A R, MCNAMARA J J. Model reduction of computational aerothermodynamics for hypersonic aerothermoelasticity[J]. AIAA journal, 2012, 50(1):74-84.

[215] 杨超,许赟,谢长川. 高超声速飞行器气动弹性力学研究综述

[J]. 航空学报,2010,31(1):1-11.

YANG Chao, XU Yun, XIE Changchuan. Review of studies on aeroelasticity of hypersonic vehicles[J]. Acta aeronautica et astronautica Sinica,2010,31(1):1-11(in Chinese).

[216] MCNAMARA J J. Aeroelastic and aerothermoelastic behavior of two and three dimensional surfaces in hypersonic flow[D]. Michigan:University of Michigan,2005.

[217] 杨智春, 周建, 谷迎松. 超音速气流中受热曲壁板的非线性颤振特性[J]. 力学学报,2012, 44(1):30-38.

YANG Zhichun,ZHOU Jian,GU Yingsong. Nonlinear thermal flutter of heated curved panels in supersonic air flow[J]. Chinese journal of theoretical and applied mechanics, 2012, 44(1):30-38 (in Chinese).

[218] 沈恩楠. 高超声速飞行器非巡航状态热颤振计算方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2019.

[219] GUO T Q,SHEN E,LU Z,et al. Thermal flutter prediction at trajectory points of a hypersonic vehicle based on aerothermal synchronization algorithm[J]. Aerospace science and technology, 2019 (94):105381.

[220] 杨超,赵黄达,吴志刚. 吸气式高超声速飞行器热气动弹性研究进展[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(10): 1911-1923.

YANG Chao,ZHAO Huangda,WU Zhigang. Research progress of aerothermoelasticity of air-breathing hypersonic vehicles[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2019,45(10):1911-1923(in Chinese).

[221] 叶正寅,孟宪宗,刘成,等. 高超声速飞行器气动弹性的近期进展与发展展望[J]. 空气动力学学报,2018,36(6):983-994.

YE Zhengyin, MENG Xianzong, LIU Cheng, et al. Progress and prospects on aeroelasticity of hypersonic vehicles[J]. Acta aerodynamica Sinica,2018,36(6):983-994(in Chinese).

[222] CHAVEZ F R,SCHMIDT D K. Analytical aeropropulsive-aero-elastic hypersonic-vehicle model with dynamic analysis[J]. Journal of guidance,control,and dynamics,1994,17(6):1308-1391.

[223] KLOCK R, CESNIK C E. Aerothermoelastic simulation of air-breathing hypersonic vehicles[C]//Proceedings of the 55th AIAA/ASME/ASCE/AHS/SC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Reston,VA:AIAA,2014:149.

[224] JI C,LI F,LIU Z Q. Development and testing of hypersonic flutter test capability[J]. AIAA journal,2019,57(7):2989-3002.

[225] 潘树祥,齐丕骞. 地面模拟热颤振试验研究[J]. 强度与环境, 1984(2):10-14.

PAN Shuxiang,QI Piqian. Research of ground thermal flutter simulation test[J]. Structure & environment engineering,1984(2):10-14(in Chinese).

[226] ZENG J,KINGSBURY D W, RITZ E, et al. GVT-based ground flutter test without wind tunnel[C]//Proceedings of the Structural Dynamics and Materials Conference. Denver:AIAA,2011:1-3.

[227] 王彬文. 飞行器地面颤振预估与验证技术研究[D]. 西安:西安交通大学,2019.

[228] 宋巧治,王彬文,李晓东. 基于机翼颤振风洞试验模型的地面颤振模拟试验验证[J]. 工程与试验,2021,61(2):3-7.

SONG Qiaozhi,WANG Binwen,LI Xiaodong. Ground flutter simulation test validation based on wing flutter wind tunnel test model [J]. Engineering & test,2021,61(2):3-7(in Chinese).

[229] 李晓东,杨文岐,刘浩. 基于纯随机激励的热模态试验技术研究[J]. 强度与环境,2015,42(2):52-56.

LI Xiaodong,YANG Wenqi,LIU Hao. The study of thermo-modal test technique based on true-random excitation[J]. Structure & environment engineering,2015,42(2):52-56(in Chinese).

[230] 陈浩宇,王彬文,宋巧治,等. 高超声速飞行器热颤振研究现状与展望[J]. 航空工程进展,2022,13(1):19-27.

CHEN Haoyu,WANG Binwen,SONG Qiaozhi,et al. Research progress and prospect of thermal flutter of hypersonic vehicles[J]. Advances in aeronautical science and engineering,2022,13(1):19-27(in Chinese).

(编辑　李坤璐)